

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

*Посвящается 100-летию  
со дня рождения акад. АН СССР  
Георгия Александровича Николаева*

# **СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ**

---

**справочник**

# **СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ**

---

Справочник в двух томах

## **Авторы:**

Алешин Н.П., Чернышев Г.Г., Акулов А.И.,  
Братчук С.Д., Гаврилюк В.С., Гарбуль А.Ф.,  
Гирш В.И., Гладков Э.А., Грачева К.А.,  
Григорьянц А.Г., Гриненко В.И., Зубченко А.С.,  
Исаев А.П., Каганский Б.А., Киселев С.Н.,  
Коновалов А.В., Копаев Б.В., Куркин А.С.,  
Лукин В.И., Малолетков А.В., Макаров Э.Л.,  
Маслов Б.Г., Неровный В.М., Никифоров Н.И.,  
Полевой Г.В., Рымкевич А.И., Семенов В.Н.,  
Смирнов В.В., Стеклов О.И., Сухинин Г.К.,  
Терехин А.С., Хаванов В.А., Шашин Д.М.,  
Шиганов И.Н., Щавелев Л.Н., Якушин Б.Ф.

# **СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ**

---

---

## **справочник Том 2**

Под редакцией  
Н.П. Алешина, чл.-кор. РАН,  
Г.Г. Чернышева, д-ра техн. наук



---

Москва «Машиностроение» 2004

УДК 621.791(031)

ББК 30.616

С24

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в справочнике «Сварка. Резка. Контроль», допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.*

**Сварка. Резка. Контроль:** Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. С 24 Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004.  
Т. 2 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, А.И. Акулов и др. – 480 с.: ил.

В втором томе приведены технология и особенности сварки различных материалов: стали и сплавов, чугуна, цветных металлов и сплавов, тугоплавких металлов и сплавов, металлических композиционных материалов, разнородных металлов и сплавов. Рассмотрены способы наплавки, материалы для наплавки, виды наплавочных материалов, особенности восстановления деталей наплавкой. Даны технологии нанесения различных покрытий. Изложены основы неразрушающего контроля качества сварных соединений, организация и экономика сварочного производства, техническое нормирование сварочных работ, стандартизация и сертификация в сварочном производстве, безопасность труда и средства защиты.

Для инженерно-технических работников всех отраслей промышленности, а также рекомендуется как учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 651400 – «Машиностроительные технологии и оборудование» по специальности 120500 – «Оборудование и технология сварочного производства». Справочник может быть полезен высококвалифицированным рабочим.

**ISBN** 5-217-03264-2 (Т. 2)

© Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, А.И. Акулов  
и др., 2004

**ISBN** 5-217-03262-6

© Издательство «Машиностроение», 2004

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>Глава</b>	<b>10. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>10</b>	10.4.3. Ферритные стали .....	<b>72</b>	
	10.1. Сварка конструкционных углеродистых сталей ( <i>А.И. Акулов</i> ) .....	10	10.4.4. Аустенитно-ферритные стали .....	75	
	10.1.1. Состав и свойства сталей .....	10	10.5. Сварка никелевых сплавов ( <i>Б.Ф. Якушин</i> ) .....	79	
	10.1.2. Сварка конструкционных низкоуглеродистых сталей .....	13	10.5.1. Характеристика никелевых сплавов .....	79	
	10.1.3. Сварка конструкционных средне- и высоколегированных сталей .....	31	10.5.2. Свариваемость никелевых сплавов .....	81	
	10.2. Легированные и теплоустойчивые стали ( <i>Э.Л. Макаров</i> ) .....	32	10.5.3. Технология сварки и свойства соединений .....	85	
	10.2.1. Классификация легированных сталей .....	32	10.5.4. Жаропрочность соединений .....	88	
	10.2.2. Принципы выбора технологии сварки легированных сталей .....	34	10.6. Сварка чугуна ( <i>Н.И. Никифоров</i> ) .....	89	
	10.3. Сварка аустенитных сталей ( <i>Б.Ф. Якушин</i> ) .....	47	10.6.1. Характеристика и классификация чугунов .....	89	
	10.3.1. Характеристика аустенитных сталей .....	47	10.6.2. Особенности сварки чугуна .....	89	
	10.3.2. Свойства аустенитных сталей .....	50	10.6.3. Основные способы сварки чугуна .....	90	
	10.3.3. Свариваемость аустенитных сталей .....	51	10.6.4. Газовая сварка чугуна .....	90	
	10.3.4. Технология сварки и свойства соединений .....	60	10.6.5. Дуговая сварка чугуна .....	93	
	10.3.5. Эксплуатационные свойства .....	64	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	95	
	10.4. Хромистые стали ( <i>А.С. Зубченко</i> ) .....	64	<b>Глава</b>	<b>11. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>97</b>
	10.4.1. Мартенситные стали .....	65	11.1. Легкие и цветные металлы и сплавы: алюминий, магний и их сплавы ( <i>В.И. Лужин</i> ) .....	97	
	10.4.2. Мартенситно-ферритные стали .....	70	11.2. Технология сварки и свойства сварных соединений ( <i>В.И. Лужин</i> ) .....	106	
			11.3. Медные сплавы ( <i>В.М. Неровный</i> ) .....	114	
			11.3.1. Краткие сведения о медных сплавах .....	114	

11.3.2. Особенности свариваемости медных сплавов ...	116	<b>Глава 13. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	174
11.3.3. Технология сварки и свойства соединений .....	117	13.1. Технология сварки разнородных сталей ( <i>Б.Ф. Якушин</i> ) .....	174
11.4. Сварка титана и титановых сплавов ( <i>О.И. Стеклов</i> ) ...	124	13.1.1. Применение сочетаний разнородных сталей в сварных конструкциях .....	174
11.4.1. Сплавы титана и их свариваемость .....	124	13.1.2. Свариваемость разнородных сочетаний сталей .....	176
11.4.2. Подготовка под сварку .....	128	13.1.3. Специфика формирования структуры в шве и ОШЗ .....	177
11.4.3. Дуговая сварка в защитных газах .....	132	13.1.4. Особенности технологии сварки комбинированных конструкций из сталей различных структурных классов .....	181
11.4.4. Сварка под флюсом ..	139	13.1.5. Особенности технологии сварки комбинированных конструкций из разнородных сталей одного структурного класса .....	185
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	144	13.2. Сварка стали с алюминием ( <i>В.И. Гири</i> ) .....	187
<b>Глава 12. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	145	13.3. Сварка меди со сталью ( <i>В.И. Гири</i> ) .....	189
12.1. Свариваемость тугоплавких металлов и сплавов ( <i>И.Н. Шиганов</i> ) .....	145	13.4. Сварка сталей с титановыми сплавами ( <i>В.И. Гири</i> ) ...	192
12.2. Технология сварки циркония ( <i>И.Н. Шиганов</i> ) .....	148	13.5. Сварка меди с алюминием ( <i>В.И. Гири</i> ) .....	193
12.3. Технология сварки сплавов на основе ниобия, ванадия и tantalа ( <i>И.Н. Шиганов</i> ) .....	150	13.6. Сварка меди с титаном ( <i>О.И. Стеклов</i> ) .....	196
12.4. Технология сварки сплавов на основе молибдена, вольфрама и хрома ( <i>И.Н. Шиганов</i> ) .....	156	13.7. Сварка меди с тугоплавкими металлами (молибденом, вольфрамом, tantalом, ниобием) ( <i>О.И. Стеклов</i> ) .....	200
12.5. Композиционные материалы с металлической матрицей ( <i>Г.Г. Чернышов, И.Н. Шиганов</i> ) .....	161	13.8. Сварка титана с алюминием ( <i>О.И. Стеклов</i> ) .....	201
12.5.1. Классификация КМ ..	162	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	206
12.5.2. Межфазное взаимодействие в КМ .....	163	<b>Глава 14. ТЕХНОЛОГИЯ НАПЛАВКИ (В.С. Гаврилюк) ...</b>	207
12.5.3. Способы производства КМ .....	164	14.1. Назначение и способы наплавки ( <i>В.С. Гаврилюк</i> ) .....	207
12.5.4. Сварка композиционных сплавов .....	166	14.1.1. Ручная дуговая наплавка покрытыми электродами .....	207
12.5.5. Сварка волокнистых и дисперсно-наполненных КМ .....	170		
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	173		

14.1.2. Механизированная и автоматическая наплавка под флюсом .....	207	Глава 15. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ <i>(В.М. Неровный)</i> .....	224
14.1.3. Плазменная наплавка .....	207	15.1. Краткие сведения о покрытиях .....	224
14.1.4. Электрошлаковая наплавка .....	208	15.2. Основные методы газотермического и вакуумного конденсационного нанесения покрытий .....	224
14.1.5. Лазерная наплавка ...	208	15.2.1. Технологические особенности газотермических методов нанесения покрытий .....	225
14.1.6. Электронно-лучевая наплавка .....	208	15.2.2. Технологические особенности вакуумного конденсационного напыления ...	230
14.1.7. Газовая наплавка ....	208	15.3. Основы технологии нанесения покрытий .....	231
14.1.8. Индукционная наплавка .....	209	15.4. Коррозионно-стойкие покрытия .....	233
14.1.9. Электроконтактная наплавка .....	209	15.5. Тепло- и жаростойкие покрытия .....	233
14.1.10. Плакирование поверхности листов энергией взрыва .....	209	15.6. Износостойкие покрытия .....	234
14.1.11. Наплавка трением ...	209	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	236
14.2. Материалы для наплавки	209		
14.2.1. Перлитные материалы .....	210	Глава 16. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ <i>(Н.П. Алешин)</i> .....	237
14.2.2. Мартенситные материалы .....	210	16.1. Виды дефектов сварных соединений .....	237
14.2.3. Высокомарганцовистые аустенитные материалы .....	210	16.1.1. Дефекты контактной сварки .....	242
14.2.4. Высокохромистые материалы .....	210	16.1.2. Дефекты клеевых и kleesварных соединений ....	243
14.2.5. Коррозионно-стойкие материалы .....	211	16.1.3. Дефекты паяных соединений .....	243
14.3. Виды наплавочных материалов .....	211	16.2. Влияние дефектов на работоспособность конструкций и способы их исправления .....	244
14.3.1. Покрытие электроды .....	211	16.3. Радиационные методы контроля .....	248
14.3.2. Проволока стальная сварочная, применяемая для наплавки .....	213	16.3.1. Общие сведения .....	248
14.3.3. Порошковая наплавочная проволока .....	215	16.3.2. Источники ионизирующего излучения и материалы .....	252
14.3.4. Наплавочные ленточные электроды .....	217	16.3.3. Источники излучения на базе ускорителей .....	259
14.3.5. Прутки для наплавки .....	220		
14.3.6. Плавленые карбиды вольфрама (релиты) .....	220		
14.4. Особенности восстановления деталей наплавкой .....	221		
14.5. Дефекты наплавки .....	222		

---

16.3.4. Технология радиографического контроля .....	266	17.4. Промышленные роботы (ПР) в сварочном производстве .....	360
16.3.5. Методы радиоскопии, радиометрии и томографии .....	277	17.4.1. Варианты конструкции ПР .....	360
16.4. Ультразвуковые методы контроля .....	282	17.4.2. Классификация ПР ...	361
16.4.1. Основные понятия ...	282	17.4.3. Факторы снижения стоимости ПР .....	363
16.4.2. Свойства УЗ колебаний .....	285	17.5. Методы измерения объема производства сварных конструкций и показатели производительности труда .....	366
16.4.3. Акустический тракт совмещенного преобразователя .....	292	17.6. Формы оплаты труда .....	368
16.4.4. Методы .....	295	17.7. Экономические расчеты на стадии проектирования и производства сварных конструкций .....	370
16.4.5. Средства УЗ контроля	299	17.8. Экономические расчеты при разработке (совершенствовании) вариантов технологических процессов изготовления сварных конструкций ...	373
16.4.6. Технология контроля сварных соединений .....	305	17.9. Расчет экономического эффекта по результатам, затратам и прибыли .....	380
16.5. Магнитная и вихретоковая дефектоскопия .....	328	17.10. Техническое нормирование сварочных работ .....	384
16.5.1. Основные понятия ...	328	17.10.1. Нормы труда и их характеристика .....	384
16.5.2. Магнитопорошковый метод .....	334	17.10.2. Методы технического нормирования .....	387
16.5.3. Магнитографический метод .....	339	17.10.3. Нормирование ручной электродуговой сварки	391
16.5.4. Вихретоковый метод	341	17.10.4. Нормирование механизированной и автоматической сварки под флюсом .....	393
16.6. Капиллярные методы контроля .....	344	17.10.5. Нормирование электрошлаковой сварки .....	397
16.6.1. Дефектоскопические материалы .....	345	17.10.6. Нормирование газовой сварки .....	398
16.6.2. Аппаратура капиллярного неразрушающего контроля .....	345	17.10.7. Нормирование контактной сварки .....	399
16.7. Методы контроля на герметичность .....	349	17.10.8. Нормирование газовой резки металла .....	401
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>351</b>	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>403</b>
<b>Глава 17. ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА (К.А. Гравчева) .....</b>	<b>353</b>		
17.1. Концентрация сварочно-го производства .....	353		
17.2. Специализация свароч-ного производства .....	355		
17.3. Производственные мощ-ности сварочных цехов .....	358		

---

<b>Глава 18. БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (А.С. Терехин)</b> .....	405		
18.1. Требования безопасности труда и защиты окружающей среды .....	405	18.2.3. Защита от электромагнитных полей (ЭМП), излучений .....	427
18.1.1. Опасные и вредные производственные факторы	405	18.2.4. Защита от лазерного излучения .....	429
18.1.2. Требования безопасности труда .....	405	18.2.5. Защита от ионизирующих излучений .....	430
18.1.3. Технологические процессы и оборудование .....	410	18.2.6. Электробезопасность	435
18.1.4. Производственные помещения .....	410	18.3. Защита окружающей среды от загрязнений .....	438
18.1.5. Размещение оборудования и организация рабочих мест .....	411	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	441
18.1.6. Сварочные материалы и заготовки .....	411		
18.1.7. Пожаро- и взрывобезопасность .....	413	<b>Глава 19. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (Б.Г. Маслов)</b> .....	442
18.1.8. Персонал .....	413	19.1. Проектирование ТП сварки .....	442
18.1.9. Средства индивидуальной защиты (СИЗ) .....	413	19.1.1. Принципы проектирования ТП сварки .....	442
18.1.10. Требования защиты окружающей среды .....	414	19.1.2. Разработка типового ТП сварки .....	443
18.2. Средства защиты .....	417	19.1.3. Нормативно-техническая документация (НТД) на сварочные ТП .....	444
18.2.1. Вентиляция .....	417	19.2. Нормативные документы на сварочные процессы .....	452
18.2.2. Защита от вибраций, шума и ультразвука .....	422	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	464
		<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> .....	465

## Глава 10

# ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

### 10.1. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

#### 10.1.1. СОСТАВ И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

В сварочной технике в зависимости от содержания углерода конструкционные углеродистые стали условно разделяют на три группы: низко-, средне- и высокоуглеродистые с содержанием соответственно до 0,25; 0,26...0,45 и 0,46...0,75 % С. Они широко применяются при производстве машиностроительных конструкций, работающих при температурах  $-40\ldots+425$  °C. Технология сварки этих сталей различна. Даже для стальных одной марки в зависимости от ее плавочного состава и условий эксплуатации сварной конструкции технология сварки может существенно различаться.

Углерод является основным легирующим элементом в углеродистых конструкционных стальных и определяет их механические свойства. Повышение его содержания усложняет технологию сварки и затрудняет получение равнопрочного сварного соединения без дефектов. По качественному признаку углеродистые стали разделяют на две группы: обычновенного качества и качественные. По степени раскисления стали обычновенного качества обозна-

чают следующим образом: кипящую – кп, полуспокойную – пс и спокойную – сп. Кипящая сталь, содержащая  $\leq 0,07$  % Si, получается при неполном раскислении металла марганцем. Она характеризуется резко выраженной неравномерностью распределения серы и фосфора по толщине проката. Местная повышенная концентрация серы может привести к образованию кристаллизационных трещин в шве и околосшовной зоне (ОШЗ). Кипящая сталь склонна к старению в ОШЗ и переходу в хрупкое состояние при отрицательных температурах. Спокойные стали получаются при раскислении марганцем, алюминием и кремнием и содержат  $\geq 0,12$  % Si; сера и фосфор распределены в них более равномерно, чем в кипящих стальных. Эти стали менее склонны к старению и слабее реагируют на сварочный нагрев. Полуспокойная сталь по склонности к старению занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталью. Сталь обычновенного качества поставляют без термической обработки в горячекатаном состоянии. Изготовленные из нее конструкции также не подвергают последующей термической обработке. Эти стали производят по ГОСТ 380–94, 4543–71, 5520–79 и 5521–93 (табл. 10.1).

#### 10.1. Химический состав некоторых низкоуглеродистых конструкционных сталей

Марка стали	Массовая доля, %		
	C	Mn	Si
ВСт1кп	0,06...0,12	0,25...0,50	$\leq 0,05$
ВСт1 пс			0,05...0,17
ВСт1 сп			0,12...0,30
ВСт2кп			$\leq 0,07$
ВСт2 пс			0,05...0,17
ВСт2 сп			0,12...0,30
ВСт3кп		0,30...0,60	$\leq 0,07$
ВСт3 Г пс		0,40...0,65	0,05...0,17
ВСт3 сп			0,12...0,36

Окончание табл. 10.1

Марка стали	Массовая доля, %		
	C	Mn	Si
10	0,07...0,14	0,35...0,65 0,70...1,00	0,17...0,37
15	0,12...0,19		
20	0,17...0,24		
15Г	0,12...0,19		
20Г	0,17...0,24		
12К	0,08...0,16	0,40...0,70	
15К	0,12...0,20	0,35...0,65	0,15...0,30
16К		0,45...0,75	0,17...0,37
18К	0,14...0,22	0,55...0,85	
20К	0,16...0,24	0,35...0,65	0,15...0,30
C	0,14...0,20	0,50...0,90	0,12...0,35
Среднеуглеродистые	БСт5пс, ВСт5пс	0,28...0,37	0,05...0,17
	БСт5сп, ВСт5сп		0,15...0,35
	БСт5Гпс, ВСт5Гпс	0,22...0,30	0,80...1,20
	25		≤0,15
	30	0,27...0,35	0,50...0,80
	35	0,32...0,40	
Высокоуглеродистые	40	0,37...0,45	
	45	0,42...0,50	0,50...0,80
	50	0,47...0,55	
	55	0,52...0,60	
	60	0,57...0,65	

Углеродистую сталь обычного качества в соответствии с ГОСТ 380–94 подразделяют на три группы. Сталь группы А поставляют по механическим свойствам и для производства сварных конструкций не используют (группу А в обозначении стали не указывают, например Ст3). Сталь группы Б поставляют по химическому составу, а группы В – по химическому составу и механическим свойствам. Перед обозначением марок этих сталей указывают их группу, например БСт3, ВСт3. Полуспокойную сталь марок 3 и 5 производят с обычным и повышенным содержанием марганца (после номера марки ставят букву Г (см. табл. 10.1). Стали ВСт1 – ВСт3 всех степеней раскисления и сталь ВСт3Гпс, а также стали БСт1 – БСт3 всех степеней раскисления и сталь БСт3Гпс (по требованиям заказчика) поставляются с гарантией свариваемости. Для ответ-

ственных конструкций используют сталь группы В.

Углеродистую качественную сталь с нормальным (марки 10, 15 и 20) и повышенным (марки 15Г и 20Г) содержанием марганца поставляют в соответствии с ГОСТ 1050–88 и 4543–71. Она содержит пониженное количество серы. Стали этой группы применяют для изготовления конструкций в горячекатаном состоянии и в меньшем объеме после нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение). Механические свойства этих сталей зависят от термической обработки. Сварные конструкции, изготовленные из них, для повышения прочностных свойств можно подвергать последующей термической обработке. Механические свойства некоторых углеродистых сталей обычного качества и качественных сталей приведены в табл. 10.2 и 10.3.

**10.2. Механические свойства некоторых углеродистых сталей в холодном состоянии**

Марка стали	Временное сопротивление $\sigma_v$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа (не менее), для толщин, мм				Относительное удлинение $\delta_5$ , % (не менее), для толщин, мм			Изгиб на 180° для толщин до 20 мм
		До 20	20...40	40...100	>100	До 20	20...40	>40	
ВСт1кп	310...400	—	—	—	—	35	34	32	$d = 0$
ВСт1пс, ВСт1сп	320...420					34	33	31	Без оправки
ВСт2кп	330...430	220	210	200	190	33	32	30	$d = 0$ (без оправки)
ВСт2пс, ВСт2сп	340...440	230	220	210	200	32	31	29	
ВСт3кп	370...470	240	230	220		27	26	24	$d = 0,5a$ , где $a$ – толщина образца
ВСт3пс, ВСт3сп	380...490	250	240	230	210	26	25	23	
ВСт3Гпс	380...500					—	—	—	
10	340	210	—	—	—	31	—	—	$d = 3a$
15	380	230				27			
20	420	250				25			
15Г	460	280				26			
20Г	460	280				24			
ВСт5пс	500...640	290	280	270	260	20	19	17	$d = 3a$
ВСт5сп						30			
ВСт5Гпс	460...600	—	—	—	—	—	—	—	—
25	451	—	—	—	—	274	—	—	—
30	490					294			
35	529					314			
40	568					333			
45	598					353			
50	627					373			
55	647					382			
60	676					402			

**10.3. Ударная вязкость KCV некоторых низкоуглеродистых конструкционных сталей**

Марка стали	Вид проката стали	Расположение образца относительно проката	Толщина, мм	KCV, Дж/см², не менее		
				при температуре, °C		после механического старения
				+20	-20	
ВСт3пс	Листовая	Поперек	5...9	78	39	—
			10...25	69	29	
			26...40	49	—	
ВСт3сп	Широко-полосная	Вдоль	5...9	100	50	—
			10...25	80	30	
			20...40	70	—	
	Листовая	Поперек	5...9	78	39	—
			10...30	69	29	
			31...40	49	—	
ВСт3Гпс	Широко-полосная	Вдоль	5...9	98	49	—
			10...30	78	29	
			31...40	69	—	

Углеродистые стали марок ВСт3Гпс, ВСт5Гпс, 15Г, 20Г с повышенным содержанием марганца по свариваемости следует отнести к низколегированным конструкционным стальям. Легирующие элементы, вводимые в сталь, образуя с железом, углеродом и другими элементами твердые растворы и химические соединения, изменяют их свойства. Это повышает механические свойства стали и, в частности, снижает ее порог хладноломкости. В результате появляется возможность снизить массу конструкции.

#### 10.1.2. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

**Основные сведения о свариваемости.** Эти стали обладают хорошей свариваемостью. Технология их сварки должна обеспечивать определенный комплекс требований, основными из которых являются равнопрочность сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве. Для этого механические свойства металла шва и ОШЗ должны быть не ниже нижнего предела механических свойств основного металла. В некоторых случаях конкретные условия работы конструкций допускают снижение отдельных показателей механических свойств сварного соединения. Однако швы не должны иметь трещин, непроваров, пор, подрезов, особенно при сварке ответственных конструкций. Геометрические размеры и форма швов должны соответствовать требуемым. Сварное соединение должно отличаться стойкостью к переходу в хрупкое состояние. Иногда к сварному соединению предъявляются дополнительные требования (работоспособность при вибрационных и ударных нагрузках, пониженных температурах и т.д.).

Однако во всех случаях технология должна обеспечивать максимальную производительность и экономичность процесса сварки

при требуемой надежности и долговечности конструкции.

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки и предыдущей и последующей термической обработкой. Как правило, при сварке низкоуглеродистых сталей металл шва и зона термического влияния (ЗТВ) имеет ферритно-перлитную или сорбитаобразную структуру.

Химический состав металла шва зависит от доли участия основного и электродного металлов в образовании шва и взаимодействий между металлом и шлаком и газовой фазой. При сварке рассматриваемых сталей состав металла шва незначительно отличается от состава основного металла (табл. 10.4). В металле шва меньше углерода для предупреждения образования структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. Возможное снижение прочности металла шва, вызванное уменьшением содержания углерода, компенсируется легированием металла через проволоку, покрытие или флюс марганцем и кремнием.

Повышенные скорости охлаждения металла шва способствуют увеличению его прочности (рис. 10.1), однако при этом снижаются пластические свойства и ударная вязкость. Это объясняется изменением количества и строения перлитной фазы. Скорость охлаждения металла шва определяется толщиной свариваемого металла, конструкцией сварного соединения, режимом сварки и начальной температурой изделия. Влияние скорости охлаждения в наибольшей степени проявляется при дуговой сварке однослойных угловых швов и последнего слоя многослойных угловых и стыковых швов при наложении их на холодные, предварительно сваренные швы.

#### 10.4. Средний химический состав металла шва

Металл	Массовая доля, %		
	C	Si	Mn
Основной типа ВСт3	0,14...0,22	0,05...0,30	0,30...0,60
Шва при сварке:			
– покрытыми электродами	0,08...0,13	0,20...0,25	0,30...0,90
– под флюсом	0,12...0,18	0,15...0,40	0,65...0,75
– в углекислом газе	0,10...0,16	0,20...0,47	0,57...0,79
– электрошлаковой	0,10...0,16	0,07...0,16	0,45...0,60

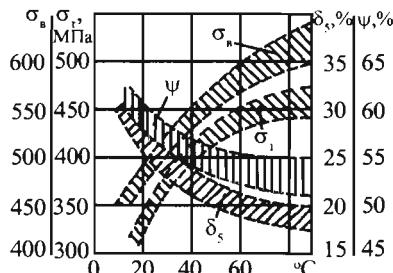


Рис. 10.1. Зависимость механических свойств металла шва от скорости охлаждения при сварке низкоуглеродистых сталей

Металл многослойных швов, кроме последних слоев, подвергающийся действию повторного термического цикла сварки, имеет более благоприятную мелкозернистую структуру. Поэтому он обладает более низкой критической температурой перехода в хрупкое состояние. Пластическая деформация, возникающая в металле шва под действием сварочных напряжений, также повышает предел текучести металла шва. Свойства сварного соединения зависят от свойств не только металла

шва, но и основного металла в ОШЗ. Структура, а значит, и свойства основного металла в ОШЗ определяются его химическим составом и изменяются в зависимости от термического цикла сварки. На рис. 10.2 слева схематически показаны кривые распределения температур по поверхности сварного соединения в один из моментов, когда металл шва находится в расплавленном состоянии, и структурные участки ЗТВ на низкоуглеродистых и низколегированных сталях при дуговой сварке.

При сварке углеродистых сталей на участке неполного расплавления металл нагревается в интервале температур между линиями солидуса и ликвидуса, отчего частично расплавляются (оплавляются) зерна металла. Пространство между нерасплавившимися зернами заполняется жидкими прослойками расплавленного металла, который может содержать элементы, вводимые в металл сварочной ванны. Это может привести к тому, что состав металла на этом участке будет отличаться от состава основного металла, а из-за нерасплавившихся зерен основного металла — и от состава наплавляемого металла.

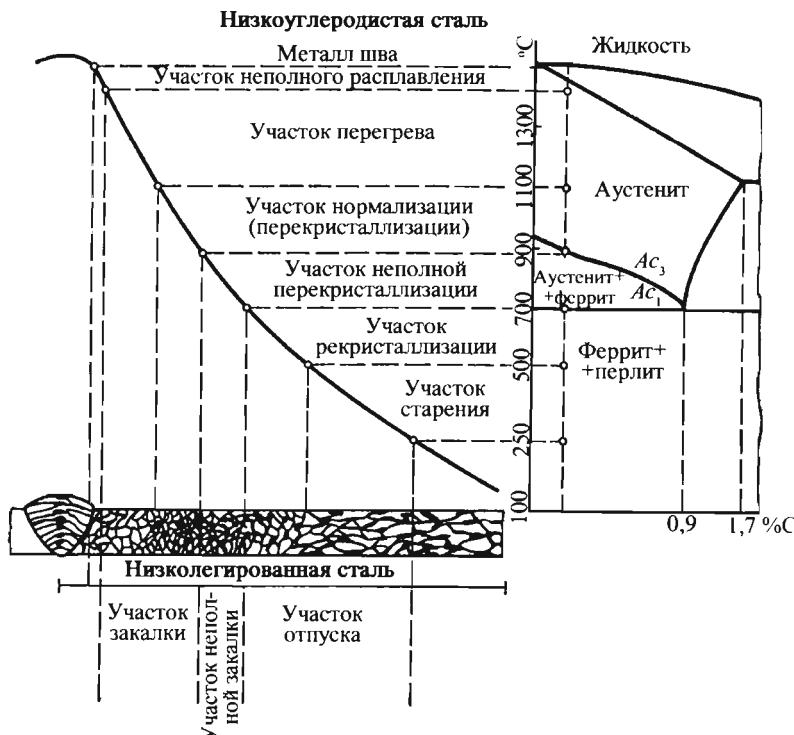


Рис. 10.2. Схема строения ЗТВ сварного шва при дуговой сварке

Увеличению химической неоднородности металла на этом участке способствует и слойная ликвация, а также диффузия элементов, которая может происходить как из основного нерасплавившегося металла в жидкий металл, так и наоборот. По существу, этот участок является местом сварки. Несмотря на его небольшую протяженность, свойства металла в нем могут существенно влиять на свойства всего сварного соединения.

На участке перегрева в результате нагрева в интервале температур от 1100...1150 °C до температур линии солидуса металл полностью переходит в состояние аустенита. При этом растет зерно, размеры которого увеличиваются тем более, чем больше нагрев металла превышает температуру точки  $Ac_3$ . Даже при непролongительном пребывании металла при температурах  $>1100$  °C значительно увеличивается размер зерен. После охлаждения это может привести к образованию неблагоприятной видманштейтовой структуры. На участке нормализации (полной перекристаллизации) металл нагревается ненамного выше температур точки  $Ac_3$ , и поэтому он имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. На участке неполной перекристаллизации металл нагревается до температур между точками  $Ac_1$  и  $Ac_3$ , поэтому данный участок характеризуется почти неизменившимися первоначальными ферритными и перлитными зернами и более мелкими зернами феррита и перлита после перекристаллизации, а также сфероидизацией перлитных участков.

На участке рекристаллизации металл нагревается от 500...550 °C до температуры точки  $Ac_1$ , и поэтому по структуре он мало отличается от основного. Если до сварки металл подвергается пластической деформации, то при нагреве в нем происходит сращивание раздробленных зерен основного металла – рекристаллизация. При значительной выдержке при этих температурах может произойти весьма заметный рост зерен. Механические свойства металла этого участка могут несколько снизиться вследствие разупрочнения из-за снятия наклена.

При нагреве металла от 100 до 500 °C (участок синеломкости) его структура в процессе сварки не претерпевает видимых изменений. Однако металл на этом участке может характеризоваться пониженной пластичностью и несколько большей прочностью. У некоторых сталей, содержащих повышенное количе-

ство кислорода и азота (обычно кипящих), металл на этом участке имеет резко сниженную ударную вязкость и сопротивляемость разрушению.

При многослойной сварке ввиду многократного воздействия термического цикла сварки на основной металл в ОШЗ строение и структура ЗТВ несколько изменяются. При сварке длинными участками после каждого последующего прохода предыдущий шов подвергается своеобразному отпуску. При сварке короткими участками шов и ОШЗ длительное время находятся в нагретом состоянии. Кроме изменения структур это увеличивает и протяженность ЗТВ. При сварке термически упрочненных сталей на участках рекристаллизации и синеломкости может произойти отпуск металла, характеризующийся структурой сорбита отпуска, с понижением его прочностных свойств. При сварке следует принять меры, предупреждающие разупрочнение стали на участке отпуска.

При газовой сварке структурные превращения в металле шва и ОШЗ характеризуются образованием типичной для литого металла крупнокристаллической структуры с равновесными зернами неправильной формы. Чем меньше перегрев металла шва при сварке и чем больше скорость охлаждения, тем меньше зерно и тем выше его механические свойства. Поэтому сварку целесообразно вести с максимально возможной скоростью. ЗТВ состоит из тех же характерных участков, что и при дуговой сварке. Однако ширина участков ЗТВ значительно больше вследствие менее концентрированного тепловвода и более медленного охлаждения. Ширина ЗТВ (до 28 мм) зависит от толщины свариваемого металла, способа и режима сварки.

При электрошлаковой сварке структура металла швов может характеризоваться наличием: зоны 1 крупных столбчатых кристаллов (рис. 10.3, а), которые растут в направлении, обратном отводу теплоты, зоны 2 тонких столбчатых кристаллов, характеризуемой меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра, и зоны 3 равносных кристаллов, расположющейся посередине шва. Строение швов зависит от способа ЭШС, химического состава металла шва и режима сварки. Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а снижение интенсивности теплоотвода, наоборот, уменьшает ширину зоны 1. При

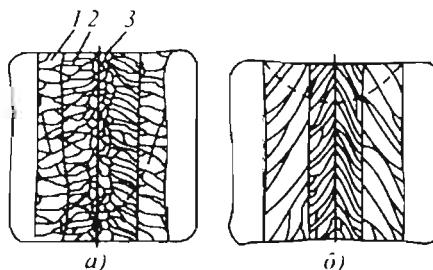


Рис. 10.3. Строение структур металла шва при ЭШС

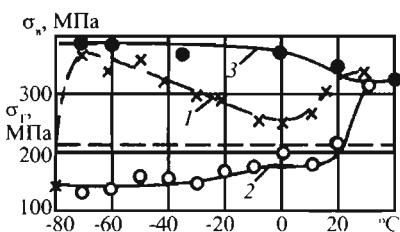
сварке проволочными электродами могут быть только первые две зоны (рис. 10.3, б) или какая-либо одна из них. Металл швов со структурой зоны 2 имеет пониженную стойкость против кристаллизационных трещин. Медленное охлаждение швов при ЭШС в интервале температур фазовых превращений способствует тому, что их структура характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов. Термический цикл ОШЗ при ЭШС характеризуется ее длительным нагревом, выдержанной при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться грубые видманштеттовы структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. В зоне перегрева может падать ударная вязкость, что устраняется последующей термической обработкой (нормализация с отпуском). Основным фактором, определяющим после окончания сварки конечную структуру металла в отдельных участках ЗТВ, является термический цикл, которому подвергался металл в этом участке при сварке. К решающим факторам термического цикла сварки относятся максимальная температура, достигаемая металлом в рассматриваемом объекте, и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков ЗТВ определяются способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла.

Рассмотренное выше разделение ЗТВ является приближенным. Переход от одного структурного участка к другому сопровождается промежуточными структурами. Кроме того, диаграмма железо – углерод здесь рассмотрена статично, в какой-то момент существования сварочной ванны. В действительности температура в точках ЗТВ изменяется во времени в соответствии с термическим циклом сварки.

Обеспечение равнопрочности сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей обычно не вызывает затруднений. Механические свойства металла ОШЗ зависят от конкретных условий сварки и вида термической обработки стали до сварки. При сварке низкоуглеродистых горячекатаных (в состоянии поставки) сталей при толщине металла до 15 мм на обычных режимах, обеспечивающих небольшие скорости охлаждения, структуры металла шва и ОШЗ примерно такие, какие были рассмотрены выше. Повышение скоростей охлаждения при сварке на формированных режимах металла увеличенной толщины, а также однопроходных угловых швов при отрицательных температурах и т.д. может привести к появлению в металле шва и на участках перегрева полной и неполной рекристаллизации в ОШЗ закалочных структур. Повышение содержания в стали марганца увеличивает эту вероятность. При этих условиях даже в случае сварки горячекатаной низкоуглеродистой стали марки ВСт3 не исключена возможность получения в сварном соединении закалочных структур. Если эта сталь перед сваркой прошла термическое упрочнение – закалку, то в ЗТВ шва на участках рекристаллизации и синеломкости будет наблюдаться отпуск металла, т.е. снижение его прочностных свойств. Изменение этих свойств зависит от погонной энергии, типа сварного соединения и условий сварки.

В процессе изготовления конструкций из углеродистых сталей на заготовительных операциях и при сварке в зонах, удаленных от высокотемпературной области, возникает холодная пластическая деформация. Попадая при наложении последующих швов под сварочный нагрев до температур  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ , эти зоны становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических и повышению прочностных свойств металла и возможному возникновению холодных трещин, особенно при низких температурах или в местах концентрации напряжений. Высокий отпуск при  $600\ldots 650^{\circ}\text{C}$  в этих случаях является эффективным средством восстановления свойств металла (рис. 10.4). Высокий отпуск применяют и для снятия сварочных напряжений.

Нормализуют сварные конструкции для улучшения структуры отдельных участков сварного соединения и выравнивания их свойств. Термическая обработка, кроме закалки сварных соединений в тех участках соеди-



**Рис. 10.4. Свойства стали ВстЗкп в зависимости от термической обработки и деформационного строения:**

1 – в исходном горячекатаном состоянии;  
2 – после 10%-ной деформации растяжения при 250 °C;  
3 – то же и последующий отпуск при 650 °C

нения, которые охлаждались с повышенными скоростями, приведшими к образованию в них неравновесных структур закалочного характера (угловые однослойные швы, последние проходы, выполненные на полностью остывших предыдущих), снижает прочностные и повышает пластические свойства металла в этих участках (табл. 10.5). При сварке короткими участками по горячим, предварительно наложенным швам замедленная скорость охлаждения металла шва и ОШЗ способствует получению равновесных структур. Влияние термической обработки в этом случае оказывается неизначительно. При ЭШС последующая термическая обработка мало изменяет механические свойства металла рассматриваемых зон. Однако нормализация приводит к резкому возрастанию ударной вязкости.

Швы, сваренные на низкоуглеродистых стальах всеми способами сварки, обладают удовлетворительной стойкостью против образования кристаллизационных трещин. Это обусловлено низким содержанием в них углерода. Однако при сварке на углеродистых стальах с содержанием >0,20 % С угловых швов и валика корня шва в многослойных швах, особенно с повышенным зазором, возможно появление в металле шва кристаллизационных трещин, что связано в основном с неблагоприятной формой провала (узкой, глубокой). Все углеродистые стали хорошо свариваются всеми способами сварки плавлением. Обычно не имеется затруднений, связанных с возможностью возникновения холодных трещин, вызванных образованием в шве или ОШЗ закалочных структур. Однако в стальях, содержащих углерод >0,25 % С или повышенное количество марганца, вероятность появления холодных трещин в указанных зонах повышается, особенно с ростом скорости охлаждения (повышение толщины металла, сварка при отрицательных температурах, сварка швами малого сечения и др.). В этих условиях предупреждение трещин достигается предварительным подогревом до 120...200 °C. Предварительная и последующая термическая обработка на низкоуглеродистых стальях, использующихся в ответственных конструкциях, служит для этой цели, а также позволяет получить необходимые механические свойства сварных соединений (высокую прочность или пластичность либо их необходимое сочетание).

### 10.5. Влияние термической обработки на механические свойства металла шва при сварке низкоуглеродистой стали

Механические свойства	Термическая обработка				
	сварка	сварка и отпуск при 600 °C	сварка и нормализация	сварка и отжиг	сварка и закалка
$\sigma_t$ , МПа	314	267	240	230	349
	315	318	307	–	–
$\sigma_b$ , МПа	463	433	382	396	544
	467	463	464	–	–
$\delta_5$ , %	255	331	351	353	244
	233	241	347	–	–
$\psi$ , %	622	699	712	715	–
	560	568	573	–	–
KCV, Дж/см <sup>2</sup>	105	125	157	134	80
	82	79	179	–	–

**Примечания.** 1. В числителе приведены механические свойства последнего шва при многослойной автоматической сварке под флюсом; в знаменателе – механические свойства металла шва при ЭШС.

2. Состав металла шва при сварке под флюсом (в %): 0,12 С; 0,75 Mn; 0,22 Si; при ЭШС: 0,14 С; 0,8 Mn; 0,07 Si.

Подготовку кромок и сборку соединения под сварку проводят в зависимости от толщины металла, типа соединения и способа сварки согласно соответствующим государственным стандартам или техническим условиям. Свариваемые детали для фиксации положения кромок относительно друг друга и выдерживания необходимых зазоров перед сваркой собирают в универсальных или специальных сборочных приспособлениях либо с помощью прихваток. Длина прихватки зависит от толщины металла и изменяется в пределах 20...120 мм при расстоянии между ними 500...800 мм. Сечение прихваток равно  $\sim V_{1/3}$  сечения шва, но  $\leq 25 \dots 30$  мм<sup>2</sup>. Прихватки выполняют покрытыми электродами или на полуавтоматах в углекислом газе. При сварке прихватки следует переплавлять полностью, так как в них могут образовываться трещины из-за высокой скорости теплоотвода. Перед сваркой прихватки тщательно зачищают и осматривают. При наличии в прихватке трещины ее вырубают или удаляют другим способом. При ЭШС детали, как правило, устанавливают с зазором, расширяющимся к концу шва. Взаимное положение деталей фиксируют скобами, установленными на расстоянии 500...1000 мм друг от друга, удаленными по мере наложения шва. При автоматических способах дуговой сварки и ЭШС в начале и конце шва устанавливают заходные и выходные планки.

Сварка стыковых швов вручную или механизированная в защитных газах и порошковыми проволоками выполняется на весу. При автоматической сварке требуются приемы, обеспечивающие предупреждение прожогов и высококачественный провар корня шва. Это

достигается применением остающихся или съемных подкладок, ручной или механизированной в среде защитных газов подварки корня, флюсовой подушки и других приемов. Для предупреждения образования в швах пор, трещин, непроваров и других дефектов свариваемые кромки предварительно тщательно зачищают от шлака, оставшегося после термической резки ржавчины, масла и других загрязнений. Дуговую сварку ответственных конструкций лучше проводить с двух сторон. Выбор способа заполнения разделки при многослойной сварке зависит от толщины металла и термической обработки стали перед сваркой. При появлении в швах дефектов (пор, трещин, непроваров, подрезов и т.д.) металл в месте дефекта удаляют механическим путем или термической резкой и после зачистки подваривают. При сварке от выбора техники и режима сварки (при изменении формы провара и доли участия основного металла в формировании шва) зависят состав и свойства металла шва.

**Газовая сварка.** При сварке низкоуглеродистых сталей используется только нормальное пламя, с  $\beta = V_k / V_a = 1 \dots 1,2$ . Мощность пламени при левом способе сварки 100...130 дм<sup>3</sup>/ч, при правом 120...150 дм<sup>3</sup>/ч ацетилена на 1 мм толщины свариваемого металла. Диаметр присадки  $d_{\text{пр}}$  для левого способа (в мм)  $\sim b/2+1$ , для правого  $\sim b/2$ . Материал присадки – сварочная проволока марок Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2 (последние три проволоки дают лучшие результаты). Применять флюс не требуется. Состав пламени значительно влияет на состав и свойства металла шва (табл. 10.6).

### 10.6. Влияние состава пламени на состав и свойства металла шва

Металл шва	Массовая доля, %					Механические свойства			
	C	Mn	Si	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	σ <sub>б</sub> , МПА	δ, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	HB
Основной металл и такой же присадочный	0,12	0,65	0,01	0,005	0,008	390...420	24...25	120...150	125...130
При $\beta = 1 \dots 1,2$	0,09	0,45		0,02		350...380	15...19	60...80	124
При $\beta = 1,5$	0,05	0,30	следы	0,16	0,01	300...330	8...9	20	110
При $\beta = 0,8$	1,0	0,50		0,02		200...350	1...2	10	280

**Примечание.** Массовая доля серы 0,04, фосфора 0,03 %.

При сварке возможно выгорание углерода, марганца и кремния, что снижает механические свойства металла шва. Для уменьшения этого целесообразна проковка шва в горячем состоянии, а при сварке металла большой толщины — последующая термообработка (нормализация, низкотемпературный отжиг).

**Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.** Требования к конструктивным элементам подготовки кромок под сварку и геометрическим размерам сварных швов различных типов регламентируются ГОСТ 5264–80. Для сварки низкоуглеродистых сталей применяют электроды типа Э-42 (марки ОМА-2, ОЗС-23), Э-42А (УОНИ-13/45), Э-50А (УОНИ-13/55, ОЗС-18, ОЗС-25 и др.). Находят применение,

особенно в заграничной практике, высокопроизводительные электроды, содержащие в покрытии железный порошок, и электроды для сварки с глубоким проплавлением. Механические свойства металла сварных соединений, как правило, не уступают основному металлу и в зависимости от марки электрода, подготовки кромок, режима и пространственного положения сварки изменяются в широких пределах.

Электроды выбирают в зависимости от назначения конструкций и типа стали, а режим сварки — в зависимости от толщины металла, типа сварного соединения и пространственного положения сварки.

Диаметр электрода зависит от толщины свариваемого металла.

Толщина металла, мм .....	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...5,0	5,0...10,0	$\geq 10,0$
Диаметр электрода, мм ...	1,0...1,5	1,5...2,5	2,5...4,0	4,0...5,0	5,0...8,0

Рекомендуемые для электрода данной марки значения сварочного тока, его род и полярность выбирают по паспорту электрода, в котором приводят его сварочно-технологические свойства, типичный химический состав шва и механические свойства. При сварке рассматриваемых сталей обеспечиваются высокие механические свойства сварного соединения и поэтому в большинстве случаев не требуются меры по предотвращению образования в нем закалочных структур. Однако при сварке угловых швов на толстом металле и первого слоя многослойного шва для повышения стойкости металла против трещин рекомендуется предварительный подогрев до 120...150 °C.

При исправлении дефектов в сварных швах на стальных повышенной толщины швами малого сечения вследствие значительной скорости остывания металл подварочного шва и его ОШЗ имеют пониженные пластические свойства. Поэтому подваривать дефектные участки следует швами нормального сечения длиной  $\geq 100$  мм и предварительно подогревать их до 150...200 °C.

**Сварка под флюсом.** Конструктивные элементы подготовки кромок под сварку и геометрические размеры сварных швов регламентируются ГОСТ 8713–79. Сварка может выполняться на различных подкладках (флюсовой подушке, медной или флюсомедной, керамической и др.), а также по предварительной подварке покрытыми электродами или в углекислом газе.

Автоматическую сварку осуществляют электродной проволокой диаметром 3...5 мм. Равнопрочность соединения достигается подбором флюсов и сварочных проволок и выбором режимов и техники сварки. При сварке низкоуглеродистых сталей в большинстве случаев применяют флюсы АН-348-А и ОСЦ-45 и низкоуглеродистые электродные проволоки Св-08 и Св-08А. При сварке ответственных конструкций, а также ржавого металла рекомендуется использовать электродную проволоку Св-08ГА. Использование указанных материалов позволяет получить металл шва с механическими свойствами, равными или превышающими механические свойства основного металла. Благодаря этим материалам достигается высокая стойкость металла швов против образования пор и кристаллизационных трещин. При сварке без разделки кромок увеличение доли основного металла в металле шва, а значит, и некоторое повышение в нем углерода могут повысить прочностные и понизить пластические свойства металла шва.

Режимы зависят от конструкции соединения, типа шва и техники сварки (табл. 10.7 – 10.11). Свойства металла ОШЗ определяются термическим циклом сварки. При сварке угловых однослойных; стыковых и угловых швов на толстой стали типа ВСтЗ на режимах с малой погонной энергией в ОШЗ возможно образование закалочных структур с пониженной пластичностью. Для предупреждения этого увеличивают сечение швов или применяют двухдуговую сварку.

Толщина более толстого листа, мм .....	8...10	10...22	24...60
Сечение части металла шва или слоя, образованного из электродного металла, $\text{мм}^2$ .....	25	35	50

**10.7. Режимы автоматической сварки под флюсом стыковых швов без разделки кромок с обязательным зазором на флюсовой подушке**

Толщина металла, мм	Зазор, мм	Шов	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
					переменный ток	постоянный ток обратной полярности	
3	0...1,5	Односторонний	2	250...300	28...30	26...28	48...50
5	0...2			400...450			38...40
8	2...4	Двусторонний	4	550...600	28...32	26...30	48...50
				650...700	32...36		30...32
10	1...3	Односторонний	5	700...750		34...38	28...30
				650...700			32...34
12	4...5	Односторонний	5	600...650		36...40	25...27
	2...4			750...800			30...32
14	4...6	Односторонний	5	650...700		30...34	25...27
	2...4			850...900			28...30
16	5...7	Односторонний	5	700...750		38...42	20...22
	2...4			900...950			27...29
20	5...7	Односторонний	5	700...750	36...40	40...44	18...20
	2...4			950...1000			32...36
30	6...8	Двусторонний	4	750...800		44...48	22...24
	8...10			950...1000			16...18
40			5	1100...1200		40...44	12...14
50	10...12			1200...1300			10...12

**10.8. Режимы двусторонней сварки стыковых швов с V-образной разделкой кромок на флюсовой подушке**

Толщина металла, мм	Шов	Слой	Диаметр сварочной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м /ч	
14	Основной		5	850	36...38	36	
	Подварочный			750		53	
16	Основной			900		32	
	Подварочный			750		48	
20	Основной			1000	38...40	27	
	Подварочный			850	36...38	39	
24	Основной		6	1100	38...40	19	
	Подварочный			1000		33	
30	Основной			1250	40...44	14	
	Подварочный			1050		27	
34	Основной	Первый		1100...1050	38...40	18	
		Второй		15			
	Подварочный	Первый		1050		23	

**10.9. Режимы автоматической сварки под флюсом многослойных стыковых швов**

Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Слой	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Род тока, полярность	Напряжение дуги, В	Примечание
>16	V-образная	Первый		750...800	Постоянный обратной полярности	30...35	Первые два слоя сваривают на флюсовой подушке
		Второй и последующие			Переменный	35...40	
		Первый	4; 5	800...900	Постоянный обратной полярности	30...35	
		Второй и последующие			Переменный	35...40	
>22	X-образная	Первый		750...800	Постоянный обратной полярности	30...35	Вылет электрода 40...50 мм. Число слоев – в зависимости от толщины металла до полного заполнения разделки, но не менее двух слоев с каждой стороны
		Второй и последующие			Переменный	35...40	
		Первый		800...900	Постоянный обратной полярности	30...35	
		Второй и последующие			Переменный		

**10.10. Режимы автоматической сварки под флюсом угловых швов в лодочку**

Катет шва, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
			Переменный ток	Постоянный ток обратной полярности	
6	2	350...400	32...34	30...32	26...28
	3	500...550	34...36		45...47
	4	550...600	31...38	30...34	52...54
8	2	400...450	32...34	32...34	22...25
	3	550...600	34...36		28...30
	4	550...650	34...38	32...36	30...32
	5	675...725	32...34		32
10	2	400...450	34...36	32...34	12...15
	3	600...650			20...22
	4	650...700	34...38	32...36	23
	5	700...800			23...25
12	2	400...450	34...36	32...34	8...10
	4	600...650	34...38		18...20
	5	750...850	32...36		

**10.11. Режимы автоматической сварки под флюсом угловых швов наклонным электродом (ток переменный или постоянный обратной полярности)**

Катет шва, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
3	2	200...220	25...28	60
		120...200	26...28	28...30
4	3	350...370	28...30	53...55
		260...280	28...30	28...30
		450...480		54...58
5	4	450...500		58...60
		370...400	30...32	28...30
		500...530		44...46
7	4	650...700	32...34	48...50

В зависимости от условий сварки и охлаждения свойства сварных соединений на низкоуглеродистых сталях изменяются в широких пределах (табл. 10.12).

**Дуговая сварка в защитных газах.** При сварке низкоуглеродистых сталей для защиты расплавленного электродного металла и металла сварочной ванны используют углекислый газ, а также смеси газов:  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  (до 20 %),  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  (до 25 %),  $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$  (до 10 %  $\text{O}_2$  и до 20 %  $\text{CO}_2$ ). Применение смеси газов изменяет технологические свойства дуги: стабильность, характер плавления электрода, температуру расплавленного металла в сварочной ванне и, что особенно важно, глубину и форму проплавления основного металла. Естественно, что при этом изменяются режимы сварки, а также состав и свойства металла шва. Однако при использовании сварочных проволок Св-08ГС и Св-08Г2С свойства сварных соединений на низкоуглеродистых сталях не уступают основному металлу. Сварка выполняется как автоматами, так и полуавтоматами.

В некоторых случаях для сварки используют неплавящийся угольный или графитовый электрод (табл. 10.13).

Этот способ применяют при сварке бортовых соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной 0,3...2,0 мм (например, канистр, корпусов конденсаторов и т.д.). Так как сварку выполняют без присадки, содержание кремния

и марганца в металле шва невелико. В результате прочность соединения составляет 50...70 % от прочности основного металла.

При автоматической и механизированной сварке плавящимся электродом швов, расположенных в различных пространственных положениях, используют электродную проволоку диаметром до 1,2 мм, а при сварке швов, находящихся в нижнем положении, – проволоку диаметром 1,2...3,0 мм.

Для сварки в углекислом газе низкоуглеродистых сталей рекомендуется следующая проволока:

Сталь .....	ВСт1, ВСт2	ВСт3
Проволока .....	Св-08ГС,	Св-08ГС,
	Св-08Г2С,	Св-08Г2С
	Св-12ГС	

Структура и свойства металла швов и ОШЗ на низкоуглеродистых сталях зависят от использованной электродной проволоки, состава и свойств основного металла и режима сварки (термического цикла сварки, доли участия основного металла в формировании шва и формы шва). Влияние этих условий и технологические рекомендации примерно такие же, как и при ручной дуговой сварке и сварке под флюсом.

Некоторые рекомендации по режимам сварки приведены в табл. 10.14 – 10.16.

### 10.12. Механические свойства металла шва, выполненного под флюсом

Сталь	Флюс	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
ВСт3сп	АН-348-А	≥250	380...490	≥26	≥70
		250...350	440...500	25...30	80...140
10ХСНД		510	593	26,4	110
17ГС	АН-60	365	555	17,5	–

### 10.13. Режимы сварки бортовых соединений угольным электродом в углекислом газе

Толщина металла, мм	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Длина дуги	Вылет электрода	Диаметр электрода
			мм	мм	мм
0,5	20...25	50...55	2...2,5	15...20	3
	90...95	60...65		30...35	6
2,0	120...130	50...55	2...3	40...45	

**10.14. Рекомендуемые ток, напряжение дуги и вылет электрода при сварке в углекислом газе**

Диаметр электродной проволоки мм	Вылет электрода	Ток, А	Напряжение дуги, В
0,5	6...10	30...100	18...20
0,8	8...12	60...150	18...22
1,0	8...14	80...180	18...24
1,2	10...15	90...220	18...28
1,6	14...20	120...850	18...32
2,0	15...25	200...500	22...34
2,5	15...35	250...600	24...38

**10.15. Режимы механизированной и автоматической сварки стыковых швов без разделки кромок в углекислом газе**

Толщина металла мм	Зазор	Число слоев	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа на один слой, л/мин
0,6...1,0	0,5...0,8	Один	0,5...0,8	50...60	18...20	20...25	6...7
1,2...2,0	0,8...1,0		0,8...1,0	70...100		18...24	10...12
3...5	1,6...2,0		1,6...2,0	180...200	28...30	20...22	14...16
6...12*	1,8...2,2		2,0	250...300		18...22	16...18
						16...20	18...20

\* Сварка с разделкой кромок.

**10.16. Режимы автоматической и механизированной сварки угловых швов в углекислом газе**

Толщина металла мм	Диаметр электродной проволоки	Катет шва	Число слоев	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки одного слоя, м/ч	Вылет, мм	Расход газа на один слой, л/мин
1...1,3	0,5	1,0...1,2	Один	50...60	18...20	18...20	5...6	5...6
	0,6	1,2...2,0		60...70		8...10		
1,5...2	0,8	60...75		70...110	16...18	16...18	6...8	6...8
		1,5...3,0		90...130		10...12	8...10	8...10
1,5...3	1,2	120...150		120...150	20...22	14...16		
		150...180		150...180		16...18	12...14	12...14
3...4	1,6	20...22	2,0	20...22	28...30	20...22	16...18	16...18
		230...260		230...260		26...28		
5...6		260...300		260...300	300...350	29...31	16...18	16...18
		7,0...9,0		7,0...9,0		20...22		
Не менее катета шва	2,0	9,0...11,0	Dва	9,0...11,0	30...32	20...22	20...24	18...20
		11,0...13,0	Три	11,0...13,0		24...26		
		13,0...15,0	Четыре	13,0...15,0		24...26		

Сварка на повышенных токах приводит к получению металла швов с пониженными пластичностью и ударной вязкостью, что, вероятно, объясняется большими скоростями охлаждения. Свойства металла швов при обычных режимах соответствуют свойствам металла швов, выполненных электродами типа Э-50А (табл. 10.17). В промышленности находит применение и сварка в углекислом газе порошковыми проволоками, например ПП-АН4, ПП-АН8 и др. Диаметр проволоки обычно 2...3 мм, сварочный ток  $\geq 350$  А, поэтому объем металла в сварочной ванне большой, и сварка ими обычно ведется в нижнем положении или горизонтальных швов на вертикали. Уменьшение диаметра проволоки требует дополнительных проходов при ее протяжке, что значительно увеличивает стоимость проволоки. Применение этих проволок позволяет в более широком диапазоне варьировать состав и свойства металла шва, улучшать его формирование. Технологические особенности сварки в углекислом газе порошковыми проволоками и свойства сварных соединений, полученных без дополнительной защиты, примерно одинаковые (см. далее).

**Сварка самозащитной порошковой проволокой.** Преимуществами сварки открытой дугой порошковой проволокой по сравнению со сваркой в углекислом газе являются отсутствие необходимости в газовой аппаратуре и возможность сварки на сквозняках, при которых наблюдается сдувание защитной струи углекислого газа. При правильно выбранном режиме сварки обеспечиваются устойчивое горение дуги и хорошее формирование шва. В качестве источников тока можно использовать выпрямители и преобразователи с кругопадающими внешними вольт-амперными характеристиками. Недостатком этого способа сварки является возможность сварки только в нижнем и вертикальном положениях из-за увеличенного диаметра выпускаемых промышленностью проволок и повышенной чувствительности процесса сварки к образованию в швах пор при изменениях вылета электрода и напряжения дуги. К отличительным особенностям порошковых проволок относится также малая глубина проплавления основного металла. Ориентировочные режимы сварки порошковыми проволоками приведены в табл. 10.18.

### 10.17. Механические свойства металла швов при сварке низкоуглеродистых сталей в углекислом газе

Сталь	Сварочная проволока	$\sigma_t$	$\sigma_b$	$\delta, \%$	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
		МПа	МПа		
ВСт3кп	Св-08ГС	380...400	520...560	23...30	120...150
БСт3кп		420...440	550...580	24...29	110...130
БСт3сп	Св-08Г2С	430...450	560...580	20...25	120...140

**Примечание.** Диаметр сварочной проволоки 2 мм; сила тока 300...340 А; напряжение дуги 28...30 В; скорость сварки 20 м/ч; сварка выполняется в три слоя.

### 10.18. Технологические характеристики самозащитных порошковых проволок

Марка и диаметр проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Вылет электрода, мм	Положение сварки	Назначение	
ПП-АН3; 3,0	350...420	24...20	20...30	Н	Строительные и дорожные машины	
ПП-АН7; 2,4	230...300	22...25	20...40		Машиностроительные конструкции	
ПП-АН8; 2,2	350...400	26...33	25...30		Стали с содержанием до 0,25 % С	
ПП-АН10; 2,2	350...400	26...32			Стали толщиной >3 мм	
ПП-АН29; 1,8...2,2	250...350	24...30	15...20		Конструкции, эксплуатируемые при низких температурах	

Условные обозначения: Н – нижнее положение; Г – горизонтальный шов на вертикали.

Механические свойства металла шва (табл. 10.19) соответствуют механическим свойствам шва, выполненного электродом типа Э-50 или Э-50А.

**Электрошлаковая сварка (ЭШС).** Ее широко применяют при изготовлении ответственных конструкций большой толщины. Равнопрочность сварного соединения достигается легированием металла шва через электродную проволоку и при переходе элементов из расплавляемого металла кромок основного металла. Последующая термическая обработка, кроме снижения остаточных напряжений, благоприятно влияет на структуру и свойства сварных соединений. При ЭШС рассматриваемых сталей используют флюсы АН-8, АН-8М, ФЦ-1, ФЦ-7 и АН-22.

Выбор электродной проволоки зависит от состава стали. При сварке низкоуглеродистых спокойных сталей с содержанием до 0,15 % С хорошие результаты дает использование проволок Св-08А и Св-08ГА. Для предупреждения образования газовых полостей и пузырей при сварке кипящих сталей, содержащих мало кремния, рекомендуется электродная проволока Св-08ГС, содержащая 0,6...0,85 % Si. При сварке стали ВСт3 удовлетворительные результаты достигаются при использовании электродных проволок Св-08ГА, Св-10Г2 и Св-08ГС. При ЭШС низкоуглеродистых сталей равнопрочность металла шва и сварного соединения обеспечивается в состоянии после сварки, отпуска и после нормализации и отпуска. Однако ударная вязкость металла шва и металла на участке перегрева ОШЗ в состоянии после сварки при 20 °C меньше ударной вязкости основного металла. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 10.20. Механические свойства сварного соединения при ЭШС повышают различными технологическими приемами. Введение в шлаковую ванну

порошкообразной присадки (это может быть крупка из рубленой проволоки) снижает перегрев металла в металлической ванне, и в результате уменьшается время пребывания металла шва и ОШЗ при высоких температурах, а также возможность образования видманштеттевой структуры. Ударная вязкость металла ОШЗ повышается так же, как и производительность сварки. Сварка с принудительным сопутствующим охлаждением влияет на характер структур в сварном соединении, обеспечивая их повышенную дисперсность и однородность. Повышается ударная вязкость при низких температурах. Химический состав металла шва и механические свойства сварных соединений см. в табл. 10.4 и 10.5.

**Контактная сварка.** При контактной сварке металл в зоне сварки подвергается термомеханическому воздействию. При точечной и шовной сварке химический состав металла литой зоны соединения не изменяется, так как изолирован от воздуха. При стыковой сварке состав металла в зоне сварки изменяется в результате взаимодействия с кислородом и азотом воздуха, испарения, удаления при осадке легкоплавких расплавов и т.д. Во всех случаях сварки металл шва имеет литую структуру и отличается от структуры основного металла. При стыковой сварке в зоне стыка могут образовываться такие дефекты, как усадочные рыхлоты, раковины, трещины и др. Металл стыка характеризуется увеличенным размером зерен. В зависимости от состава стали закристаллизовавшийся металл соединения может иметь различную структуру. В большинстве случаев это ферритно-перлитная структура, но при повышенных скоростях охлаждения могут образовываться видманштеттова и даже мартенситная структуры, особенно при повышенном содержании в стали углерода. При стыковой сварке в зоне стыка ввиду окисления углерода может

**10.19. Механические свойства металла швов при сварке самозащитными порошковыми проволоками**

Марка проволоки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
ПП-АН3	500...650	440	22	80
ПП-АН7	550...650			
ПП-АН8				
ПП-АН10	500...650			
ПП-АН29				
ПП-СП-10	500...659			

### 10.20. Ориентировочные режимы ЭШС низкоуглеродистых сталей

Толщина металла, мм	Сварочный ток на один электрод, А	Напряжение сварки, В	Число электролов	Диаметр (сечение)	Расстояние между электродами	Скорость, м/ч	
						мм	подачи
<i>Проволочный электрод</i>							
30	350...370	32...34	1	2,5	—	172	0,9...1,0
70	650	47				371...400	1,0...1,1
90	600...620	42...46				300	1,6
150	450...500	44...50	2	65	220...240	220...240	0,8...0,9
200	550	46...48				250	0,5
250	500...550	50...55				230...250	0,4...0,5
340	400...450	46...48	3	3,0	110	200...220	0,3
<i>Пластинчатый электрод</i>							
100	1000...1200	28...30	1	(10 × 90)	—	1,6	0,5
200							
300	1500...1800	30...32	2	(10 × 135)			0,45

наблюдаться обезуглероженная зона. При сварке стали с содержанием 0,25 % С непосредственно в стыке его количество может понижаться до 0,1 %. Это снижает механические свойства сварного соединения, чему способствует искривление волокон в месте сварки. Структура и свойства основного металла в ОШЗ также изменяются в результате термомеханического воздействия сварки. Они зависят от состава металла и предшествующей механической и термической обработки.

При контактной сварке низкоуглеродистых сталей прочность и пластичность металла шва и ОШЗ практически не уменьшаются. Сварной стык, выполненный на низкоуглеродистой стали стыковой сваркой оплавлением без последующей термической обработки, обладает высокой прочностью при статической, ударной и циклической нагрузках. Ударная вязкость образцов с надрезом в плоскости стыка 60...120 МПа. Относительно невысокая ударная вязкость и значительное рассеяние результатов объясняются крупным зерном в зоне сварного стыка. Ударная вязкость может быть повышена последующей термической обработкой (высоким отпуском или нормализацией).

Перед сваркой заготовки правят, поверхности их очищают от загрязнений и взаимно

подгоняют. При сварке неочищенных заготовок снижается качество сварного соединения и увеличивается износ электродов контактных машин. При точечной и шовной сварке возможны выплески и подплавление поверхности. Способ очистки зависит от размеров заготовок, характера загрязнений и типа производства. Для точечной и шовной сварки холоднокатаную сталь можно только обезжиривать. Ржавчину, а также слой окалины на горячекатаной стали удаляют травлением в растворах кислот с последующей нейтрализацией щелочным раствором и промывкой водой или подвергают пескоструйной обработке, предварительной очистке наждачными кругами, металлическими щетками и др. Мелкие детали в условиях массового производства очищают в галтовочных барабанах. Торцы заготовок для стыковой сварки обрабатывают до получения поверхности, перпендикулярной к оси заготовок, а после термической резки зачищают от шлака. Под точечную и шовную сварку заготовки собирают в сборочно-сварочных приспособлениях или на выполненных точечной сваркой прихватках с шагом 50...80 мм. Точечной и шовной сваркой сваривают металл толщиной 0,05...6 мм; основной тип соединения – нахлесточное. Режим точечной и шовной сварки выбирают в зависимости от свойств и толщины

металла и особенностей имеющегося оборудования. Режимы, приведенные в табл. 10.21 – 10.25, являются ориентировочными и подлежат корректировке в конкретных условиях.

Для сварки сталей толщиной до 4 мм используют универсальные серийные машины. При сварке низкоуглеродистых сталей толщиной до 2 мм переменный ток промышленной частоты протекает непрерывно в виде одного импульса, а давление, приложенное к электродам, остается постоянным на протяжении всего процесса. При большей толщине кроме основного дается дополнительный импульс или используется цикл с одним импульсом и переменной силой давления (проковкой). Шовную сварку осуществляют при постоянных скорости сварки и давлении и прерывистом включении тока.

Стыковая сварка сопротивлением (см. табл. 10.25) из-за неравномерности нагрева и окисления металла на торцах заготовок дает пониженное качество соединения, и поэтому ее применяют ограниченно (для деталей с площадью сечения до 250  $\text{мм}^2$ ). Лучшие результаты достигаются при сварке оплавлением. Образование в соединении закалочных структур исключается при сварке оплавлением с подогревом. Этот же способ применяют при сварке деталей с большой площадью сечения (до 1000  $\text{мм}^2$  непрерывным оплавлением и деталей большего сечения – с подогревом).

Способ и режим стыковой сварки (табл. 10.26, 10.27) выбирают в зависимости от материала, величины и формы поперечного сечения свариваемых заготовок с учетом требований к сварному изделию и имеющегося оборудования. Для равномерного нагрева и одинаковой пластической деформации обеих заготовок их форму и размеры сечения возле стыка следует выполнять примерно одинаковыми; диаметры не должны различаться более чем на 15 %, а толщина – более чем на 10 %.

Различные покрытия, наносимые на поверхность стали для повышения ее коррозионной стойкости (оцинкованные, освинцованные, алитированные стали, стали с фосфатным покрытием) усложняют процесс точечной сварки. Мягкие покрытия снижают сопротивление деформации металла, что вызывает необходимость повышения сварочного тока (на 20...50 %) по сравнению с точечной сваркой обычной стали. Основная трудность сварки этих материалов заключается в активном взаимодействии металлов электрода и покрытия, приводящем к снижению коррозионной стойкости соединения и быстрому износу электродов. Свариваемость улучшается при сварке на жестких режимах, уменьшении толщины покрытий, интенсивном охлаждении электродов. Удовлетворительные результаты достигаются при рельефной сварке.

### 10.21. Размеры точечных и шовных соединений, мм

Толщина тонкой детали	Диаметр литого ядра	Ширина шва	Минимальная нахлестка при однородном шве	Минимальный шаг точек
0,3	2,5...3,5	2,0...3,0	6	7
0,8	3,5...4,5	3,0...4,0	10...12	11
1,0	4,0...5,0	3,5...4,5	12...14	12
1,5	6,5...7,5	5,5...6,5	16...18	14
2,0	7,0...8,5	6,5...8	18...20	18
3,0	9,0...10,5	8,0...9,5	24...26	35
4,0	11...13	10,0...11,5	28...30	45
5,0	13...15	12,0...13,5	34...36	55
6,0	15...17	14,0...15,5	38...43	65

### 10.22. Режимы точечной сварки

Параметр	Толщина заготовок, мм								
	0,5 + 0,5	1 + 1	1,5 + 1,5	2 + 2	2,5 + 2,5	3 + 3	4 + 4	5 + 5	6 + 6
Диаметр контактной поверхности, мм:									
– начальный	5	5	6	7	8	10	12	14	
– перед запиливанием	6		7	8	10	12	14	15	
Продолжительность прохождения сварочного тока, с	0,2...0,3	0,25...0,35			0,4...0,6	0,6...1	0,8...1,1	0,9...1,2	1,1...1,5
Сила на электродах, Н	300...400	800...1200	1200...1600	1600...2000	2000...2500	5000...6000	6000...8000	8000...9000	9000...12 000
Сила тока, А	4000...5000	6000...7000	7000...8000	8000...9000	11 000...12 000	12 000...16 000	14 000...18 000	17 000...22 000	20 000...25 000

### 10.23. Режимы непрерывной шовной сварки

Параметр	Толщина заготовок, мм								
	0,2 + 0,2	0,5 + 0,5	1 + 1	0,2 + 0,2	0,5 + 0,5	1 + 1	0,2 + 0,2	0,5 + 0,5	1 + 1
Ширина роликов, мм	4	5		4	5		4	5	
Сила сжатия, Н	800	1000	1200	800	1000	1200	800	1000	1200
Скорость сварки, м/мин	1			1,5			2		
Сила тока, А	2500	3000	3500	3000	3500	5000	3500	4500	7000

**10.24. Режимы прерывистой шовной сварки низкоуглеродистой стали**

Параметр	Толщина заготовок, мм						
	0,25 + 0,25	0,5 + 0,5	0,75 + 0,75	1 + 1	1,25 + 1,25	1,5 + 1,5	2 + 2
Ширина контактной поверхности роликов, мм	5		6		8,5		10
Сила сжатия, Н	1750	2250	3000	4000	4500	5250	6500
Продолжительность включения тока, с	0,04		0,06		0,08		0,1
Приблизительное число прерываний:							
– в секунду	16	12,5	10	8	7	6	5
– на 1 м шва	500	400	333	386	252	250	200
Сила тока, А	8000	11 000	13 000	15 000	16 500	17 500	19 000
Примерный шаг точек, мм	2	2,5	3	3,5	3,9	4	5

**10.25. Режимы стыковой сварки сопротивлением круглых или квадратных заготовок из углеродистой стали при давлении осадки 10...30 МПа**

Параметр	Площадь сечения заготовки, мм <sup>2</sup>			
	7	25	50	100
Установочная длина на обе заготовки, мм	7	12	16	20
Припуск на осадку, мм:				
– общий	2,2	2,5	2,7	3,0
– под током	1,6	1,7	1,8	2,0
– без тока	0,6	0,8	0,9	1,0
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	–	200	160	140
Время нагрева, с	0,2...0,3	0,6...0,8	0,8...1,0	1,0...1,5

**Примечание.** Припуск на осадку указан для сварки заготовок с плотно подогнанными торцами.

**10.26. Наименьшие напряжения холостого хода (в В) при стыковой сварке**

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Сварка		
	сопротивлением	непрерывным оплавлением	оплавлением с предварительным подогревом
До 50	1,5	4	3,5
>50...100	2	4,5	4
>100...250	2,5	5	4,5
>250...500	3	6,5	5
>500...1000		8	5,5
>1000...2000		10	6
>2000...5000			6,5
>5000...10 000			7

**10.27. Припуски (в мм) при стыковой сварке оплавлением стержней из низкоуглеродистых конструкционных сталей (на оба стержня)**

Диаметр стержня, мм	Площадь сечения, $\text{мм}^2$	Припуск при сварке с подогревом			Припуск при сварке непрерывным оплавлением		
		общий	на оплавление	на осадку	общий	на оплавление	на осадку
5	20	—	—	—	6	4	2,0
10	78	7,3	5	2,3	8	5,7	2,3
14	154	9,3	6,5	2,8	12	9,5	2,5
18	254	11,2	8,0	3,2	16	13	3,0
22	380	12,6	9,0	3,6	18	14,8	3,2
26	530	15	11,2	3,8	22	18,5	3,5
30	707	16	12,0	4,0	25	21,5	3,5
36	1018	18	13,0	5,0	30	26	4,0
40	1257	20	14,5	5,5	33	28,5	4,5
45	1590	21	15,0	6,0	37	31,5	5,5
65	2376	23	16,0	7,0	—	—	—
60	2827	25	17,5	7,5	—	—	—
70	3848	26	18,0	8,0	—	—	—
80	5027	28	19,5	8,5	—	—	—
90	6362	32	23,0	9,0	—	—	—
100	7850	38	28,0	10,0	—	—	—

**Примечания.** 1. Суммарная установочная длина равна 1,5 диаметра стержня.

2. При наличии зазоров между неровно срезанными торцами надо соответственно увеличить общий припуск на сварку (за счет припуска на оплавление).

3. Припуск на осадку под током составляет 40...50 % общего припуска на осадку.

#### 10.1.3. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕ- И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

С увеличением содержания углерода свариваемость сталей затрудняется: повышается склонность к перегреву и закалке, образованию холодных и горячих трещин и пор в металле шва, трудно достигается равнопрочность металла шва с основным металлом.

Для уменьшения вероятности появления горячих трещин в металле шва стремятся снизить в нем содержание углерода. Это достигается применением низкоуглеродистых сварочных материалов с малым содержанием водорода и уменьшением провара основного металла (рекомендуется сварка с разделкой кромок и на пониженных режимах). Необходимым условием получения сварных соединений без пор и трещин является предварительный или сопутствующий подогрев (для среднеуглеродистых сталей до 250...300 °C), который снижает закаливаемость стали. Последующий высокий от-

пуск улучшает структуру и свойства закаленных зон и уменьшает остаточные сварочные напряжения.

При газовой сварке среднеуглеродистых сталей с целью уменьшения окислительных реакций в металле сварочной ванны (образование пор) применяют нормальное пламя и с некоторым избытком ацетилена. Мощность пламени несколько понижена: до 75...100 дм<sup>3</sup>/ч на 1 мм толщины металла. Применять флюс чаще всего не требуется. В качестве присадочного металла используется сварочная проволока марок Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10ГС и Св-10ГСМ. При толщине металла >3 мм требуется предварительный подогрев до температуры 250...350 °C или местный нагрев горелками до 650...700 °C. Последующий отпуск при 600...650 °C улучшает структуру и свойства металла сварного соединения. Прочность сварных соединений обычно в пределах 80 % от прочности основного металла.

**При сварке покрытыми электродами** среднеуглеродистых сталей используют электроды марок УОНИ-13/45, УОНИ-13/55 и ОЗС-33.

Для уменьшения вероятности образования в сварном соединении закалочных структур следует уменьшать скорость охлаждения снижением скорости сварки, предварительным подогревом. Однако при этом сварные соединения малопластичны. Для улучшения их свойств необходима последующая закалка с отпуском. Прочность сварных соединений обычно  $\leq 90\%$  от прочности основного металла.

**Сварку под флюсом** среднеуглеродистых сталей ведут на пониженных режимах, т.е. с низкой производительностью, поэтому данный способ сварки используется ограниченно.

Технология сварки в углекислом газе для предупреждения трещин в металле шва и околошовной зоне предусматривает вышеуказанные мероприятия: снижение в металле шва содержания углерода применением сварочных проволок марок Св-08ГС и Св-08Г2С; уменьшение провара кромок; предварительный или сопутствующий подогрев; выбор приемов и режимов сварки, уменьшающих скорость охлаждения металла шва.

**При ЭШС** замедленное охлаждение и возможность уменьшить провар кромок позволяют получить сварные соединения с удовлетворительными свойствами. Однако и здесь при сварке металла с содержанием углерода  $> 0,3\% \text{ C}$  требуется подогрев до  $180\dots 200^\circ\text{C}$ . Но и при этом способе сварки равнопрочность сварного соединения не достигается. Для сварки используют сварочную проволоку марок Св-10Г2, Св-12ГС, Св-10Г2С и флюсы АН-8 или АН-99. Положительные результаты дает применение порошкообразного присадочного материала, так как при этом снижается температура металлической ванны, а значит и скорость охлаждения металла сварного соединения.

**Контактная сварка** среднеуглеродистых сталей имеет некоторые особенности. Стали характеризуются: высоким сопротивлением пластической деформации, значительным интервалом кристаллизации и склонностью к закалке. Это вызывает существенное снижение пластичности металла и возможность образования трещин. Сила тока невелика (см. табл. 10.22 – 10.25), а сварочные силы и силы осадки в 1,5 – 2 раза больше. При этом заметно повышается скорость оплавления и осадки

деталей. Для предупреждения трещин в ядре рекомендуется ковочная сила при толщине деталей  $> 1,5 \text{ mm}$ . Снижение сопротивления деформации и склонности к образованию трещин достигается при относительно медленном нагреве и охлаждении зон сварки. Для этого при точечной и шовной сварке используются мягкие режимы, модуляция тока или многоимпульсный режим (два или три импульса), при стыковой сварке – предварительный подогрев и последующая термообработка в самой машине или другими способами.

**Свариваемость** **высокоуглеродистых** **сталей** затруднена. Их практически не применяют для изготовления сварных конструкций. В основном проводится ремонт или наплавка деталей из подобных сталей.

## 10.2. ЛЕГИРОВАННЫЕ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫЕ СТАЛИ

### 10.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

К легированным относится широкая номенклатура конструкционных сталей. Они классифицируются по следующим основным признакам: химическому составу, структуре, свойствам и назначению. В каждой из этих категорий стали, в свою очередь, подразделяются по ряду других признаков, главным образом отражающих их механические и технологические свойства.

По химическому составу стали разделяются на:

- низколегированные, в которых суммарная массовая доля легирующих элементов  $\leq 2,5\%$  (ГОСТ 19281–89);
- легированные (среднелегированные), где доля легирующих элементов лежит в диапазоне  $2,5\dots 10\%$  (ГОСТ 4543–71).

В зависимости от вида основных легирующих элементов сталь называют: марганцовистой, хромистой, хромомолибденованадиевой и т.п.

По структуре, полученной при охлаждении на воздухе после нагрева до  $900^\circ\text{C}$ , стали бывают ферритно-перлитными, перлитными, бейнитными и мартенситными.

По свойствам они подразделяются на стали: нормальной и повышенной прочности; хладостойкие; жаропрочные (теплоустойчивые); устойчивые против атмосферной коррозии и коррозии в морской воде; упрочняемые термической и термохимической обработкой и т.п.

По назначению стали классифицируются на две основные группы:

- строительные, применяемые в основном для изготовления сварных конструкций, для которых не предусматривается, за некоторым исключением, термическая обработка;

- машиностроительные, предназначенные, главным образом, для производства деталей механизмов и машин, корпусных конструкций и т.п. В настоящее время широко внедряется технология изготовления комбинированных ковано-, штампо-, литосварных деталей. Большинство такого рода деталей подвергается последующей термической или химико-термической обработке.

**Строительные стали.** Они подразделяются на ряд категорий в зависимости от вида конструкций, для изготовления которых они применяются, и требований, предъявляемых к свойствам сварных соединений.

1. *Стали массового применения.* Это низколегированные стали нормальной прочности, ферритно-перлитного класса. Они поставляются в виде листового и фасонного проката, труб, обычно в состоянии после горячей прокатки.

Основные требования к ним: уровень прочности (по ГОСТ 27772-88 обозначаются С345 и С375, где С – строительная, цифры – предел текучести) и хладостойкость (по ГОСТ 19281-89 категорий 6...15 с нормированной ударной вязкостью KСU при температурах -40 и -70 °C и после деформационного старения при температуре +20 °C).

2. *Мостостроительные стали,* служащие для изготовления конструкций авто- и железнодорожных мостов. Дополнительное требование к ним по сравнению со сталью п. 1 – повышенное сопротивление атмосферной коррозии (ГОСТ 6713-91).

3. *Стали повышенной прочности с карбонитридным упрочнением* (С390 и С440). Готовый прокат поставляют в нормализованном состоянии. Структура сталей – ферритно-перлитная мелкозернистая с дисперсными частицами карбонитридов.

4. *Стали высокопрочные с карбонитридным упрочнением*, легированные молибденом, ванадием и бором (С590 и С733). Они поставляются в состоянии закалки и отпуска. Структура – бейнитная. Эти стали практически не разупрочняются в ЗТВ сварных соединений.

5. *Стали, упрочняемые контролируемой прокаткой* (при температурах 850...700 °C в

период полиморфного γ-α-превращения). Наибольшее применение с таким упрочнением нашли стали, легированные ванадием, ниобием или титаном.

6. *Судостроительные стали нормальной, повышенной прочности и хладостойкие.* Сейчас выпускаются стали с нормированной прочностью А32, А36, А40; D32, D36, D40; Е32, Е36, Е40 (А, D, Е – температура сохранения нормированной ударной вязкости соответственно при +20, -20, -40 °C; цифра – предел прочности соответственно 315; 355 и 390 МПа). Эти стали обладают высоким сопротивлением хрупкому разрушению, которое оценивается нормированной температурой перехода из хрупкого в вязкое состояние  $T_{xp}$  (температура торможения трещины в образцах натуральной толщины). Поставляются в горячекатаном или нормализованном состоянии. Структура ферритно-перлитная.

7. *Стали судостроительные высоко-прочные хладостойкие.* Их предел текучести 490 и 690 МПа. Предназначены они для сварных конструкций, эксплуатируемых при температурах до -40 °C (стали открытых методов выплавки) и до -60 °C (стали электрошлакового переплава). Поставляются эти стали в состоянии закалки и высокого отпуска. Структура – сорбит, упрочненный дисперсными частицами карбидов.

8. *Стали для труб горячей воды и пара – жаропрочные (теплоустойчивые), легированные Cr – Mo – V, перлитного класса, предназначенные для эксплуатации при температурах до 600 °C.* Они поставляются в состоянии нормализации или закалки с высоким отпуском. Структура – сорбит с дисперсными частицами карбидов, обеспечивающими совместно с легированием жаропрочность стали. К ним предъявляются требования по нормированному пределу длительной прочности ( $\sigma_t^T$  – напряжению, при котором разрушается гладкий образец при заданных температуре и времени). Сварные соединения могут иметь зону разупрочнения на участке нагрева в интервале температур  $A_1 - A_3$ , в котором резко снижается жаропрочность, что может привести к уменьшению срока эксплуатации сварных труб.

9. *Высокопрочные низкоотпущеные стали* с пределом текучести  $\sigma_{0.2} \leq 1500$  МПа. Структура – низкоотпущененный мартенсит. Эти стали применяются в конструкциях современных летательных аппаратов; они чувствитель-

ны к концентраторам напряжений, должны иметь нормированное значение силового критерия трещиностойкости  $K_{Ic}$  (критический коэффициент интенсивности напряжений).

**Машиностроительные стали.** 1. Цементируемые низкоуглеродистые низко- и среднелегированные стали служат для изготовления деталей механизмов передач, зубчатых колес, валов и других деталей, подвергаются цементации и нитроцементации с последующей закалкой и высоким отпуском.

2. Улучшаемые среднеуглеродистые низко- и среднелегированные стали используются в состоянии закалки и высокого отпуска. Структура – сорбит или троостит отпуска. Из этих сталей изготавливают тяжелонагруженные детали, работающие при знакопеременных нагрузках. К ним предъявляются требования по нормированной выносливости ( $\sigma_{-1} \approx 0,5\sigma_b$ ). Данные стали чувствительны к концентрации напряжений.

3. Жаропрочные стали. Это среднеуглеродистые легированные Cr–Mo–V стали, перлитного класса, предназначенные для изготовления изделий энергетического машиностроения (валы и роторы паровых турбин, крепежные детали и т.п.).

Химический состав и механические свойства типовых сталей упомянутых групп приведены в табл. 10.28 и 10.29.

#### 10.2.2. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Выбор параметров технологии сварки легированных сталей направлен на получение бездефектных соединений со свойствами, равнозначными свойствам основного металла. В практике эта цель интегрально формулируется как обеспечение «равнопрочности» сварного соединения основному металлу.

Дефекты в сварных соединениях легированных сталей можно условно разделить на технологические (несплавления, непровары, подрезы и т.п.) и metallургические, основными из которых являются холодные трещины (ХТ) в ЗТВ, а в ряде случаев – и в сварном шве. Технологические дефекты исключают соблюдением рекомендаций по подготовке и монтажу сварных соединений и режимам их сварки.

Образование ХТ предотвращают обеспечением достаточной свариваемости стали в условиях заданной конструкции, способа и режимов сварки.

Номенклатура и значение свойств сварных соединений должны соответствовать эксплуатационным требованиям, предъявляемым к конкретному типу сварных конструкций исходя из их назначения. Практически они совпадают с требованиями к основному металлу (см. табл. 10.29). В отдельных случаях эти требования могут отличаться в определенных пределах из-за отличия химического состава сварного шва от состава основного металла и особенностей структуры ЗТВ. При прикладной оценке свариваемости стали, выполняемой применительно к конкретному типу сварных конструкций, упомянутые требования наряду со стойкостью против ХТ рассматриваются также как показатели свариваемости (см. разд. 1.5).

Процедуру выбора технологии сварки конструкций из легированных сталей можно разделить на ряд этапов, последовательное выполнение которых позволяет приблизить технологию к оптимальному сочетанию ее параметров.

Легированные конструкционные стали сваривают всеми способами сварки плавлением. При этом предпочтение следует отдавать способом, которым соответствует низкое исходное содержание диффузионного водорода в наплавленном металле (шве)  $H_{шв}$ . Такой выбор продиктован негативным влиянием диффузионного водорода на сопротивляемость металла сварного соединения образованию ХТ. Применение способов сварки с пониженным  $H_{шв}$  в ряде случаев дает возможность снизить или исключить подогрев при сварке. Ориентировочные пределы значений  $H_{шв}$  для различных способов сварки приведены в табл. 10.30.

В табл. 10.30 представлены данные, полученные различными исследователями экспериментальным путем методами хроматографического газового анализа или адекватного ему метода МИС (международного института сварки).

Широкие пределы значений  $H_{шв}$  обусловлены тем, что они зависят от многих факторов: состава покрытий электродов и флюсов; подготовки сварочных материалов (температуры прокалки электродов и флюсов, степени осушки газов); абсолютной влажности окружающего воздуха, подготовки свариваемых кромок (степени очистки от органических загрязнений, конденсированной влаги). К сожалению, до сих пор отсутствуют математические модели, описывающие зависимость  $H_{шв}$  от указанных факторов.

### 10.28. Химический состав легированных сталей

Группа сталь	Марка стали	Массовая доля, %									$C_{\text{жв}}$ ГОСТ 27772-88	$C_{\text{**}}$ МНС	$C_{\text{**}}$ BRWA			
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Сu	других примесей						
<i>Строительные материалы</i>																
1	09Г2С (С345)	0,09... 0,12	0,5... 0,8	1,3... 1,7	0,3		-	-	0,3	0,418... 0,527			0,205... 0,255			
	17Г1С (С310)	0,15... 0,2	0,4... 0,6	1,15... 1,6	0,3					0,448... 0,582			0,257... 0,329			
2	10ХСНД	0,1... 0,12	0,8... 1,1	0,5... 0,8	0,6... 0,9	0,5... 0,8		-	0,4...0,6	0,379... 0,546			0,218... 0,304			
	15ХСНД	0,12... 0,18	0,4... 0,7	0,4... 0,7		0,3... 0,6				0,346... 0,551			0,22... 0,345			
3	14Г2АФ	0,18	0,3... 0,6	1,2... 1,6	0,4	0,07... 0,12		-	0,3	0,448... 0,590			0,247... 0,331			
	16Г2АФ		0,14... 0,2	1,3... 1,7		0,08... 0,14				0,485... 0,628			0,273... 0,358			
4	14Х2ГМР	0,1... 0,17	0,17... 0,37	0,9... 1,2	1,4... 1,7	0,45... 0,55		-	0,3	0,002... 0,006 Nb			0,707... 0,915			
	12ГН2МФАЮ	0,09... 0,14	0,2... 0,5	0,9... 1,4	0,2... 0,5	1,4... 1,75	0,15... 0,25			0,05...0,1 Al. 0,02...0,03 N <sub>2</sub>			0,38... 0,505			
5	09Г2ФБ	0,08... 0,13	0,15... 0,35	1,5... 1,7	0,3	0,05... 0,09		-	0,09... 0,12	0,364... 0,607			0,268... 0,411			
	10Г2ФБ	0,09... 0,12		1,55... 1,75		0,02...0,05 Nb				0,407... 0,501			0,21... 0,274			
6	10ГНБ-Ш	0,08... 0,11	0,1... 0,4	1,15... 1,65	0,65... 1,05	0,02...0,04 Nb		-	0,05	0,428... 0,502			0,264... 0,269			
	10ХНДМ-Ш	0,2... 0,4	0,3... 0,65	0,35... 0,75		0,5... 0,9	0,05... 0,17			0,352... 0,487			0,210... 0,292			
7	12ХН2МД	0,09... 0,13	0,2... 0,4	0,45... 0,75	1,05... 1,3	1,8... 2,2	0,1... 0,18	0,03	0,35... 0,65	0,236... 0,453			0,262... 0,489			
	12ХН3МД-Ш	0,1... 0,14		0,6... 0,9	0,8... 1,1	2,8... 3,2	0,35... 0,45			0,482... 0,574...			0,348... 0,434...			
	12ХН4МДБ-Ш	0,09... 0,13		0,4... 0,7	0,6... 0,9	3,5... 4	0,35... 0,45			0,508... 0,634...			0,299... 0,556			

Окончание табл. 10.28

Группа сталей	Марка стали	Массовая доля, %								$C_{\text{экв}}$ ГОСТ 27772-88	$C_{\text{экв}}$ МИС	$C_{\text{экв}}$ BRWA	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu				
8	12Х1МФ	0,08... 0,15	0,17... 0,37	0,4... 0,7	0,9... 1,2	$\leq 0,3$	0,2... 0,3	0,15... 0,3	-	-	0,402... 0,626	0,424... 0,662	0,245... 0,385
	15ХМ1Ф	0,1... 0,17	0,15... 0,35		1,1... 1,4		0,9... 1,1	0,2... 0,35			0,639... 0,888	0,632... 0,891	0,36... 0,51
	15Х2НМФА	0,13... 0,18	0,17... 0,37	0,30... 0,60	1,8... 2,3	1,0... 1,5	0,5... 0,7	0,10... 0,12	$\leq 0,3$		0,727... 0,998	0,753... 1,039	0,444... 0,611
9	35ХГСА	0,32... 0,39	1,1... 1,4	0,8... 1,1	1,1... 1,4	$\leq 0,3$	-	-	-	-	0,727... 0,919	0,739... 0,932	0,49... 0,605
	30ХГЧН2А	0,27... 0,34	0,9... 1,2	0,9... 1,2	-	1,4... 1,8					0,672... 0,875	0,730... 0,95	0,498... 0,64
	40ХГЧН3ВА	0,4	0,65	0,7	1,0	2,75					0,3 W	0,812	0,927
<i>Машиностроительные стали</i>													
1	18ХГТ	0,17... 0,23	0,17... 0,37	0,8... 1,1	1... 1,3	-	-	$\leq 0,3$	-	0,03...0,09 Ti	0,51... 0,683	0,51... 0,683	0,31... 0,415
	20ХН3А	0,17... 0,24		0,3... 0,6	0,6... 0,9	2,75... 3,15					0,439... 0,637	0,55... 0,765	0,428... 0,569
	18Х2Н4А	0,14... 0,2		0,25... 0,55	1,35... 1,65	4... 4,4	0,3... 0,4				0,657... 0,87	0,805... 1,030	0,584... 0,726
2	40Х	0,36... 0,44	0,17... 0,37	0,5... 0,8	0,8... 1,1	$\leq 0,3$	-	$\leq 0,3$	-	0,31...0,39 V	0,581... 0,839	0,59... 0,848	0,425... 0,609
	30ХМА	0,26... 0,33		0,4... 0,7	-						0,464... 0,712	0,473... 0,722	0,32... 0,494
	38ХН3МФА	0,33... 0,4		0,25... 0,5	0,8... 1,2	3... 3,5	0,35... 0,45	0,1... 0,18			0,731... 0,974	0,848... 1,18	0,667... 0,841
3	25Х1МФ	0,22... 0,29	0,25... 0,35	0,4... 0,7	1,5... 1,8	$\leq 0,3$	0,25... 0,3	0,15... 0,2	0,3...0,5 W	0,689... 0,914	0,707... 0,946	0,45... 0,59	
	20Х3МВФ	0,15... 0,23		0,25... 0,5	2,8... 3,3			0,6... 0,85			0,871... 1,143	0,982... 1,302	0,557... 0,745
	25Х2М1Ф	0,22... 0,29		0,4... 0,7	2,1... 2,6		0,9... 1,1	0,3... 0,5	0,2		0,982... 1,280	0,987... 1,295	0,609... 0,765

Примечание. BRWA – Британская сварочная исследовательская ассоциация; МИС – Международный институт сварки.

## 10.29. Механические свойства легированных сталей

Группа сталей	Марка стали	Толщина, мм	Термообработка	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_u$	$\delta$	$\phi$	KCU	KCV	Специальные свойства	
				МПа	%			Дж/см <sup>2</sup>			
<i>Строительные стали</i>											
1	09Г2С (С345)			365	490	21				Уровень нормальной прочности	
	17Г1С (С310)			400	570	24					
2	10ХСНД		В состоянии после горячей прокатки	390	530...670	19				Повышенное сопротивление атмосферной коррозии	
	15ХСНД			335	490...685	21					
3	14Г2АФ		Нормализация	390	540	20				Уровень повышенной прочности	
	16Г2АФ			440	590						
4	14Х2ГМР		Закалка и высокий отпуск	590	685	14				Уровень высокой прочности	
	12ГН2МФАЮ			590...	685...						
5	09Г2ФБ	10...28		785	880					Уровень повышенной прочности; хладостойкость	
	10Г2ФБ			430	520	20					
6	10ГНБ-III	26...40	Нормализация	450	560	17				$\leq 78$ (при $-60^{\circ}\text{C}$ )	
	10ХНДМ-III	33...40		355	470...	$\leq 21$					
				390	510...	$\leq 20$				$\leq 70$ (при $-40^{\circ}\text{C}$ )	
	12ХН2МД	10...70	Закалка и высокий отпуск	490	510...	$\leq 20$	$\leq 55$		$\leq 47$ (при $-40^{\circ}\text{C}$ )	Уровень высокой прочности; хладостойкость, повышенное сопротивление коррозии в морской воде	
7	12ХН3МД-Ш	70...130		590	670...	$\leq 16$			$\leq 58$ (при $-50^{\circ}\text{C}$ )		
	12ХН4МДБ-Ш	70...130		690	745...	890					

Окончание табл. 10.29

Группа стали	Марка стали	Толщина, мм	Термообработка	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_b$	$\delta$	$\phi$	KCU	KCV	Специальные свойства		
				МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>				
8	12Х1МФ	-	Закалка и высокий отпуск	350	540	25	67	27	-	Жаропрочность; $\sigma_{10^4}^{600} = 110$ МПа		
	15ХМ1Ф			330	520			15		$\sigma_{10^4}^{540} = 80$ МПа		
	15Х2НМФА			490	610	15	55	—		—		
9	35ХГСА	-	Закалка и низкий отпуск	1500	1700	12	48	40	-	Уровень высокой прочности; регламентированная трещиностойкость		
	30ХГСН2А			1600	1850	13	50	60				
	40ХГСН3ВА			1700	2000	11	45	40				
<i>Машиностроительные стали</i>												
1	18ХГТ	-	Закалка и низкий отпуск	880	980	9	50	78	-	Регламентированный уровень выносливости		
	20ХН3А			1270	1510	15	60	73				
	18Х2Н4А			1170	1470	12	64	114				
2	40Х	-	Закалка и высокий отпуск	720	860	14	60	147	-	Жаропрочность		
	30ХМА			1080	1130	16		127				
	38ХН3МФА			1130	1200	14	55	88				
3	25Х1МФ	-	Закалка и высокий отпуск	880	960	19	69	127				
	20Х3МВФ			810	910	13	45	44				
	25Х2М1Ф			730...	870...							
				810	910							

### 10.30. Ориентировочные значения исходной концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле ( $H_{w0}$ )

Вид сварки	$H_{w0}$ , см <sup>3</sup> /100 г
Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	4...10
Автоматическая сварка под флюсом	3...8
Механизированная сварка в $\text{CO}_2$	3...5
Аргонодуговая сварка плавящимся электродом	2...3
Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом	1,5...2,5
Сварка в смеси аргона (80 %) и углекислого газа (20 %)	2,5...3,5

**Примечание.** Значения  $H_{w0}$ , полученные хроматографическим методом или методом МИС, приблизительно в 2 раза превышают значения, определенные спиртовым или глицериновым методом.

Состав и свойства сварочных материалов выбираются в соответствии с требованиями к сварным соединениям конструкций из легированной стали. Марки сварочных электродов, проволок и флюсов для сварки низко- и среднелегированных сталей приведены в справочных пособиях.

При невозможности подогрева при сварке конструкций из легированных сталей (большие габаритные размеры, сложная геометрия и т.п.) применяют аустенитные сварочные материалы.

Аустенитные материалы имеют более низкую (на 50...100 °C) температуру солидуса, чем ферритно-перлитные. Это снижает степень перегрева ОШЗ и ограничивает рост аустенитного зерна. Кроме того, аустенитная структура обладает на порядок более высокой растворимостью и меньшим коэффициентом диффузии водорода. Эти факторы способствуют предотвращению ХТ без применения подогрева. Аустенитные материалы, как правило, используют для сварки среднелегированных сталей с  $C_{\text{жв}} > 0,6 \%$ , где  $C_{\text{жв}}$  – эквивалент углерода.

На следующем этапе необходимо обеспечить свариваемость стали по показателю стойкости против ХТ.

Образование ХТ обусловлено следующими основными факторами (см. разд. 1.5):

- структурой – наличием закалочных составляющих мартенсита и бейнита (S, %), повышенным размером аустенитного зерна ( $d_3$ , мкм);

- увеличенной концентрацией диффузионного водорода ( $H_1$ , см<sup>3</sup>/100 г);

- высокими растягивающими сварочными напряжениями ( $\sigma_{\text{св}}$ , МПа).

Структура – обязательный фактор, а водород и напряжения – необходимые.

Для оценки степени потенциальной возможности образования трещин с учетом влияния обязательного структурного фактора используют эквивалент углерода ( $C_{\text{жв}}$ ). Он является обобщенным параметром состава стали, характеризующим прокаливаемость, т.е. способность образовывать мартенситную структуру при заданной скорости охлаждения. Применительно к сварке принято оценивать прокаливаемость критическими скоростями охлаждения  $\omega$ , в условиях воздействия сварочного термического цикла, при которых в ЗТВ образуется 1 (5) и 90 (95) % мартенсита соответственно при  $\omega_{M1}$  и  $\omega_{M2}$ . Интенсивность охлаждения при сварке оценивают средней скоростью в диапазоне 600...500 °C ( $\omega_{6/5}$ , °C/c) или временем охлаждения в диапазоне 800...500 °C ( $t_{8/5}$ , с). Имеется определенная взаимозависимость между критическими скоростями охлаждения ( $\omega_{M1}$  и  $\omega_{M2}$ ) и  $C_{\text{жв}}$ .

Различными исследователями предложено несколько соотношений для расчета эквивалента углерода (%):

$$C_{\text{жв}} = C + Mn/20 + (Cr + Mo + V)/10 + Ni/15 \quad (\text{BRWA, 1964 г.})$$

$$C_{\text{жв}} = C + Si/24 + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (\text{МИС, 1967 г.; EN 1011-2:2001})$$

$$C_{\text{жв}} = C + Si/24 + Mn/6 + Cr/5 + Mo/4 + Ni/40 + Cu/13 + V/14 + B/2 \quad (\text{ГОСТ 27772-88})$$

Здесь BRWA – Британская сварочная исследовательская ассоциация; МИС – Международный институт сварки; EN 1011-2:2001 – Европейский стандарт. Рекомендации по сварке металлических материалов. Дуговая сварка ферритных сталей.

Принято оценивать степень потенциальной возможности образования в стальях ХТ в зависимости от значений  $C_{\text{жв}}$  (по ГОСТ 27772-88):

- первая группа сталей:  $C_{\text{жв}} \leq 0,35 \%$  – сталь не склонна к ХТ при сварке;

– вторая группа сталей:  $C_{жв} = 0,35\dots0,6\%$  – при определенных конструктивно-технологических условиях возможно образование ХТ;

– третья группа сталей:  $C_{жв} > 0,6\%$  – высокая вероятность появления ХТ; сварка выполняется со специальными технологическими мероприятиями.

Поскольку образование ХТ наряду со структурой обусловлено также концентрацией диффузионного водорода и сварочными напряжениями, то значение  $C_{жв}$  вне связи с этими условиями не может служить показателем действительной склонности к образованию трещин. Особенно это относится ко второй и третьей группам сталей.

Оценка свариваемости с помощью  $C_{жв}$  заостряет внимание разработчиков технологии сварки на необходимости целенаправленного выбора режимов сварки и специальных технологических мероприятий.

На следующем этапе возможен выбор технологии сварки, основанный на контроле за структурой в ЗТВ путем регулирования теплового режима сварки. Такой подход предусматривает исключение или ограничение процентного содержания мартенсита в структуре. При этом учитывается, что свойства мартенсита в основном зависят от содержания углерода в стали. При этом можно рекомендовать ориентироваться на следующее соотношение допустимого количества мартенсита в ЗТВ от содержания углерода (рис. 10.5).

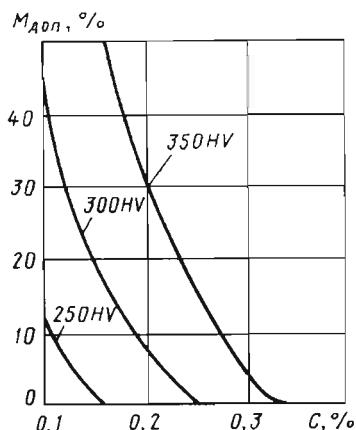


Рис. 10.5. Допустимое содержание мартенсита в структуре ЗТВ в зависимости от содержания углерода в стали и заданной твердости

На практике, особенно при затруднении металлографического анализа структуры ЗТВ, структурное состояние оценивают значением твердости. Как правило, в технических условиях на сварку изделий указывают допустимое значение твердости. В технических условиях на различные изделия оно лежит в пределах 200…350 HV. При выполнении расчетов общего характера часто принимают за допустимое значение 300 HV. Назначение допустимой твердости – предотвратить появление ХТ, а также получение требуемых механических свойств металла сварных соединений. Известна хорошая корреляция значений твердости с пределом прочности  $\sigma_y$ .

Процедура регулирования теплового режима сварки предусматривает:

- экспериментальное или расчетное определение параметров термического цикла сварки ( $t_{8/5}; \omega_{6/5}$ ) в ОШЗ ЗТВ ( $T_{max} = 1350\dots1450^{\circ}\text{C}$ ) соединения при сварке данного изделия;

- наличие диаграммы анизотермического распада аустенита в стали, из которой изготавляется изделие, применительно к сварочным термическим циклам (известна как диаграмма АРА).

Диаграмма АРА [ $T - \ln(t_{8/5})$  – структура] фиксирует критические скорости охлаждения и позволяет определить состав структуры для заданного термического цикла. Схема типовой диаграммы АРА для низко- и среднелегированных сталей представлена на рис. 10.6. Решение обратной задачи – определение допустимой скорости охлаждения  $\omega_{доп}$  по принятому допустимому содержанию мартенсита  $M_{доп}$  в структуре (см. рис. 10.5) позволяет откорректировать тепловой режим сварки, т.е. обеспечить  $\omega_{6/5} < \omega_{доп}$ . Это можно выполнить или введением предварительного или сопутствующего подогрева или увеличением погонной энергии сварки.

Такое решение продемонстрировано на примере однопроходной автоматической сварки изделия из стали 15Х2МФА (содержит 0,17 % C) толщиной 16 мм. Компьютерная модель диаграммы АРА для этой стали представлена на рис. 10.7. Стыковое соединение без разделки кромок с зазором 6 мм выполняется с полным проваром на флюсовой подушке. Рекомендованный режим: КПД = 0,9; диаметр электрода  $d_e = 5$  мм; сварочный ток  $I_{св} = 900$  А; напряжение на дуге  $U_d = 38$  В; скорость сварки

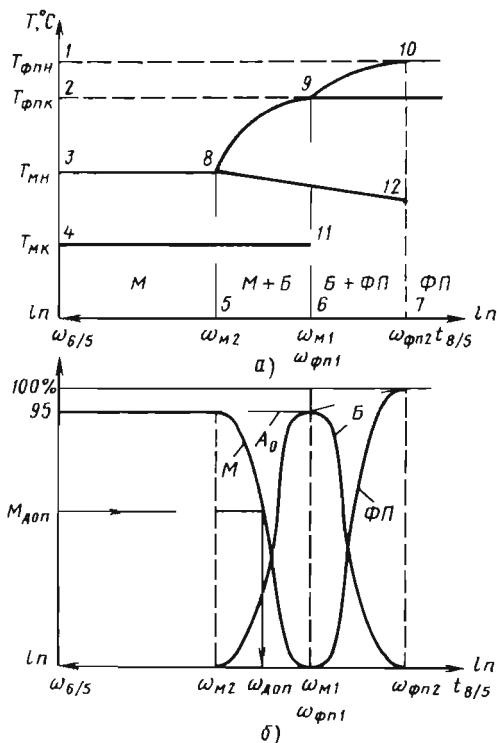


Рис. 10.6. Схема типовой диаграммы АРА для низко- и среднелегированных сталей:

а и б – температуры превращения аустенита и состав структуры в зависимости от скорости охлаждения соответственно;  $\omega_{6/5}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) и  $t_{8/5}$  ( $\text{s}$ ) – параметры сварочного термического цикла;  $\omega_{m1}$ ,  $\omega_{m2}$  – скорости охлаждения, при которых образуются 1 и 95 % мартенсита соответственно;  $\omega_{фп1}$ ,  $\omega_{фп2}$  – скорости охлаждения, при которых образуются 1 и 100 % ферритно-перлитной смеси соответственно;  $M_{доп}$  – допустимое содержание мартенсита в структуре ЗТВ;  $\omega_{доп}$  – допустимая скорость охлаждения, соответствующая  $M_{доп}$ ;  $A_o$  – остаточный аустенит;  $T_{фпн}$ ,  $T_{фпк}$ ,  $T_{mn}$  и  $T_{mk}$  – температуры начала и конца ферритно-перлитного и мартенситного превращений аустенита соответственно

$v_{cb} = 20 \text{ м/ч}$  ( $q/V = 55404 \text{ Дж/см}$ , где  $q/V$  – погонная энергия сварки). Для данного случая тепловой расчет можно выполнить по теории Н.Н. Рыкалина, приняв схему мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты, действующего по всей толщине листа. Выражение для расчета мгновенной скорости охлаждения ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) при заданной температуре  $T$  имеет следующий вид:

$$\omega = -2\pi\lambda cp(T - T_h)^3 / [q/(V\delta)]^2,$$

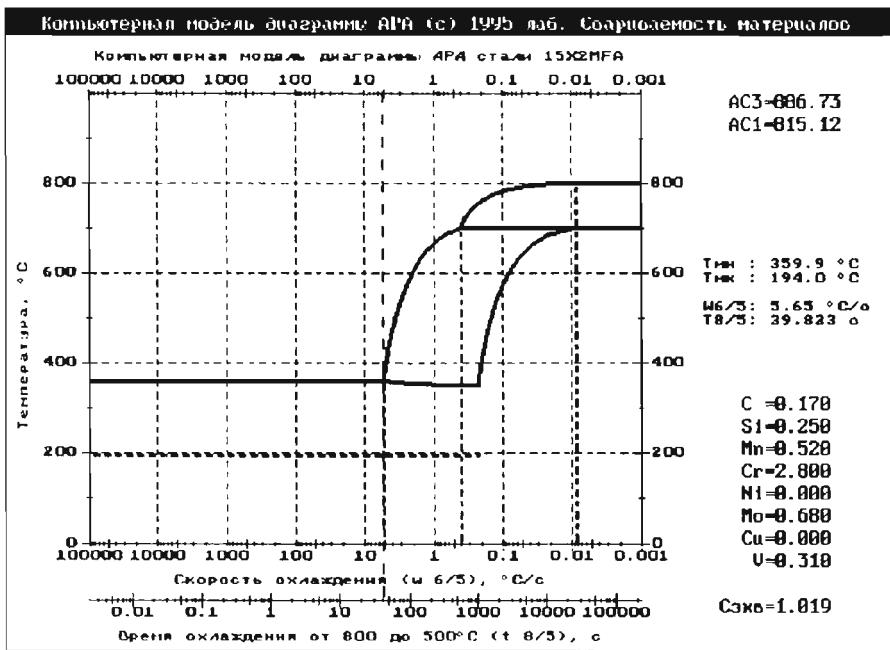
где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности [для стали 0,4  $\text{Вт}/(\text{см} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $cp$  – объемная теплоемкость [для стали 5,1  $\text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $T$  – температура наименьшей устойчивости аустенита (для стали  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ );  $T_h$  – начальная температура, в том числе и сопутствующего подогрева,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  – толщина металла, см.

Для сварки без подогрева ( $T_h = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) рассчитанная скорость охлаждения  $\omega_{550} = 1,59 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  ( $\omega_{6/5} \approx \omega_{550}$ ). Допустимая скорость охлаждения, соответствующая допустимому содержанию мартенсита в ЗТВ стали  $M_{доп} = 15 \text{ %}$ ,  $\omega_{доп} = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  (см. рис. 10.5 и 10.7). Поскольку действительная скорость охлаждения ( $\omega_{6/5} = 1,59 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) превышает допустимую ( $\omega_{доп} = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ), необходимо ее уменьшить, например, введением сопутствующего подогрева ( $T_h > 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Требуемую температуру ( $^{\circ}\text{C}$ ) сопутствующего подогрева можно определить по соотношению

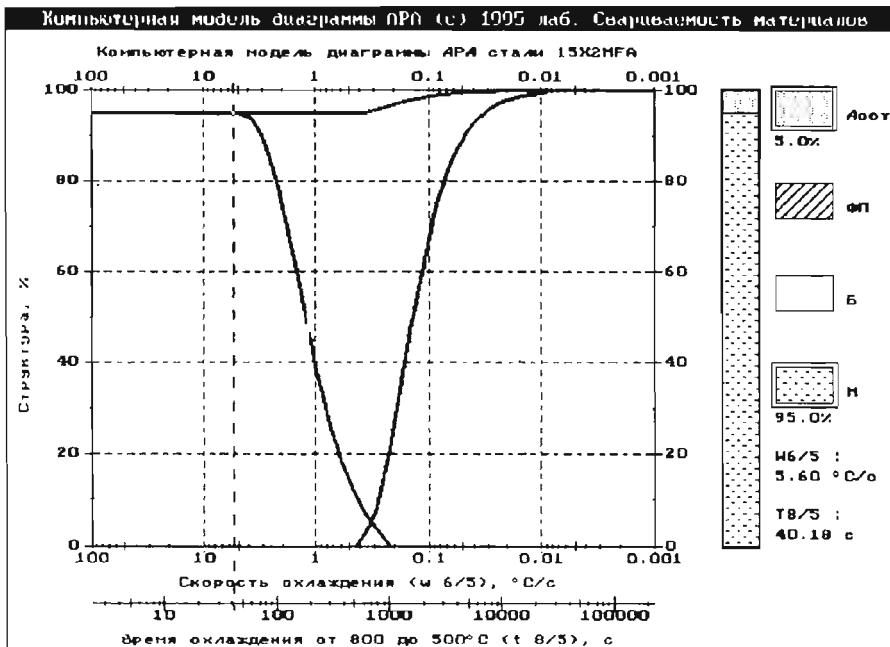
$$T_{c,p} = 550 - \sqrt[3]{\omega_{доп}[q/(V\delta)]^2 / (2\pi\lambda cp)}.$$

В данном случае определенная расчетом температура сопутствующего подогрева  $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом действительная скорость охлаждения соответствует допустимой скорости охлаждения  $\omega_{6/5} = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Таким образом обеспечивается «безопасное» содержание мартенсита в структуре ЗТВ и твердость  $\leq 300 \text{ HV}$ .

К сожалению, банк диаграмм АРА для конструкционных низко- и среднелегированных сталей весьма ограничен. Диаграммы АРА строят экспериментальным дилатометрическим методом. Применяются образцы основного металла, в которых имитируется серия сварочных термических циклов с нагревом до  $1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и регулируемым принудительным охлаждением в широком диапазоне скоростей:  $\omega_{6/5} = 0,1 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Регистрируют граничные температуры и критические скорости превращения аустенита, состав структуры продуктов превращения, который подтверждается металлографическим анализом. Процесс построения диаграмм АРА трудоемок и длителен.



a)



б)

Рис. 10.7. Компьютерная модель диаграммы АРА стали 15Х2МФА (0.17 % C).  
Обозначения см. на рис. 10.6

Европейский стандарт EN 1011-2:2001 и «Рекомендации по сварке металлических материалов. Дуговая сварка ферритных (углеродистых и низкоуглеродистых) сталей» рекомендует определять температуру подогрева  $T_p$ , °C, с целью предотвращения XT по соотношению

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh(d/35) + \\ + 62 \cdot HD^{0.35} + (53 \cdot CET - 32)Q - 328.$$

где  $CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$  – специальный эквивалент углерода стали, % (пределы значений CET = 0,2...0,5 %);  $d$  – толщина стали в пределах 10...90 мм; HD – исходная концентрация диффузионного водорода в металле шва, определенная экспериментально методом МИС, в пределах 1...20 см<sup>3</sup>/100 г Me;  $Q$  – погонная энергия сварки в пределах

0,5...4,0 кДж/мм;  $\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$  – гиперболический тангенс ( $x = d/35$ ).

В настоящее время применяют компьютерное моделирование диаграмм APA (см. рис. 10.7). Этот подход использован в инженерном программном комплексе «Свариваемость легированных сталей», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана (см. разд. 1.5). Использование более широкого банка термокинетических диаграмм (ТКД) распада аустенита, полученных применительно к термообработке ( $T - \ln t$  – структура), не всегда позволяет получить достоверную информацию для условий сварки. Во-первых, эти диаграммы построены для условий нагрева до температур  $\leq 1000$  °C, при которых степень гомогенизации аустенита и размер аустенитного зерна отличаются от этих параметров для ОШЗ сварных соединений. В связи с этим значения критических скоростей охлаждения на диаграммах APA смешены в сторону меньших значений по сравнению с ТКД. Во-вторых, весьма трудно точно наложить кривые сварочных термических циклов на ТКД и связать параметры диаграмм с параметрами циклов. Ориентировочные значения допускаемых скоростей охлаждения  $\omega_0$  для сталей, указанных в табл. 10.28, рассчитанные по компьютерным моделям их диаграмм APA, приведены в табл. 10.31.

Для сложных по геометрии сварных соединений тепловой расчет процесса сварки необходимо выполнить численным методом конечных элементов (МКЭ) с использованием

компьютерной техники. Особым случаем является многослойная сварка, при которой сварочный термический цикл и структура ЗТВ формируются под действием следующих факторов (рис. 10.8):

- автоподогрева, т.е. влияния температуры остывания предыдущего сварного валика, снижающей действительные скорости охлаждения при укладке последующих валиков;

- перекристаллизации и измельчения аустенитного зерна при втором и последующих нагревах ЗТВ до максимальных температур в диапазоне  $Ac_3 - 1000$  °C;

- самоотпуска структур при последующих нагревах до максимальных температур 400 °C –  $Ac_1$ ;

- повторный нагрев при температурах 200...400 °C, способствующий «отдыху» закалочных составляющих структуры и выходу водорода из сварного соединения. В этом случае «структурный» подход при выборе режима сварки применим только к термическому циклу 1 (возможно, и к циклам 2 и 3). Однако в процессе наложения последующих валиков структура будет изменяться в зависимости от температуры и времени действия отпусковых циклов. В результате выбор теплового режима сварки по структурному критерию может оказаться неоправданно завышенным по своим параметрам. В настоящее время наметилась тенденция сваривать легированные стали многослойными швами, по возможности с максимальным числом сварных валиков.

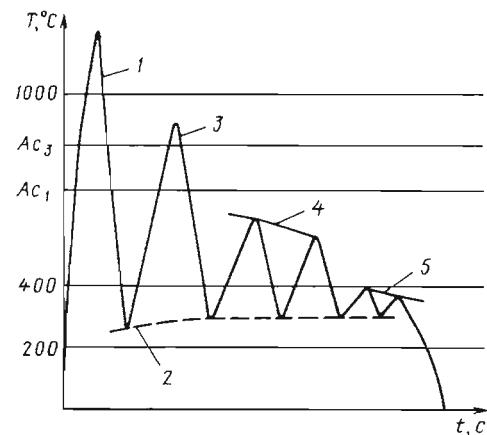


Рис. 10.8. Схема сварочного термического цикла многослойной сварки в ЗТВ:

- 1 – закалочный цикл;
- 2 – автоподогрев;
- 3 – цикл перекристаллизации и измельчения аустенитного зерна (возможна повторная закалка);
- 4 – циклы отпуска;
- 5 – циклы повторного нагрева

**10.31. Допустимые скорости охлаждения  $\omega_{\text{доп}}$  при сварке легированных сталей**

Группа сталей	Марка стали	Уровень легирования	Критические скорости, °C/c		250 HV		300 HV		350 HV		
			$\omega_{\text{M1}}$	$\omega_{\text{M2}}$	$M_{\text{доп}}, \%$	$\omega_{\text{доп}}, °\text{C}/\text{с}$	$M_{\text{300}}, \%$	$\omega_{\text{доп}}, °\text{C}/\text{с}$	$M_{\text{350}}, \%$	$\omega_{\text{доп}}, °\text{C}/\text{с}$	
<i>Строительные стали</i>											
1	09Г2С	Миним.	15,5	115	17,3	26	55	56	89	105	
		Среднее	6,85	52,5	7,8	8,0	50	23,5	75	37,5	
		Максим.	4,1	100	4,1	3,9	45	13	72	21	
	17Г1С	Миним.	7,8	58	0,2	5,7	25	16	57	30	
		Среднее	5,1	35,5	0	3,05	17,9	7,9	49,9	15,6	
		Максим.	2,8	22,5	0	2	6,7	3,1	36	7,6	
2	10ХСНД	Миним.	17	120	12,5	27,5	52	57	82	95,5	
		Среднее	6,35	49	7,8	7,45	50	21,5	77	35	
		Максим.	2,85	23	4,1	2,7	45	9,2	72	14,8	
	15ХСНД	Миним.	21,5	150	4,1	20,5	45	64	72	100	
		Среднее	7,05	54	0,2	5,2	25	15,1	57	27,1	
		Максим.	3,65	29,5	0	2,65	10	4,85	45	12,8	
3	14Г2АФ	Миним.	7,85	59	4,1	7,45	45	24,5	72	39	
		Среднее	5,55	43	1	4,3	30,6	13,0	62	23,5	
		Максим.	2,6	21,5	0	1,9	10	3,45	45	8,5	
	16Г2АФ	Миним.	5,7	44,5	1	4,45	30,6	13,8	62	24	
		Среднее	3,2	30,5	0	2,75	17,9	6,65	49,9	13,2	
		Максим.	2,05	17,0	0	1,5	6,65	2,25	36	5,65	
4	14Х2ГМР	Миним.	2,0	16,5	12,5	2,9	52	7,35	82	13,1	
		Среднее	0,72	6,45	1	0,55	3,06	1,85	62	3,4	
		Максим.	0,44	4	0	0,26	7,9	0,79	49,9	1,65	
5	10Г2ФБ	Миним.	7,25	55	17,3	12,5	55	27	89	53	
		Среднее	6,6	50,5	12,5	9,6	52	23,5	82	40	
		Максим.	3,7	29,5	4,1	3,5	45	12,1	72	19,1	
6	10ХНДМ-Ш	Миним.	115,5	735	22,5	215	61	420	90	735	
		Среднее	9,4	70	12,5	13,5	52	33	82	55,5	
		Максим.	5,65	44	7,8	6,65	50	20	77	31,5	
7	12ХН3МД-Ш	Миним.	2,45	20	17,3	2,3	55	8,05	89	13	
		Среднее	1	8,85	4,1	1,5	45	3,5	72	7,25	
		Максим.	0,86	7,5	1	0,72	30,6	2,55	62	4,65	
8	15Х2НМФА	Миним.	1,25	11,1	12,5	1,85	52	4,8	82	8,5	
		Среднее	0,57	5,15	4,1	0,54	45	1,95	72	3,25	
		Максим.	0,3	2,95	1	0,24	30,6	0,81	62	1,5	
9	30ХГСН2А	Миним.	0,86	14,5	12,5	0,68	52	3,3	82	5,8	
		Среднее	0,37	6,9	0	0,26	6,7	0,42	66	1,1	
		Максим.	0,22	4,0	0	0,155	10	0,3	45	0,75	
		Миним.	0,965	8,45	0	0,685	0	0,685	5,5	1,0	
		Среднее	0,55	5	0	0,385	0	0,385	5	0,55	
		Максим.	0,535	4,90	0	0,375	0	0,375	2,5	0,455	

Окончание табл. 10.31

Группа сталей	Марка стали	Уровень легирования	Критические скорости, °C/c		250 HV		300 HV		350 HV	
			$\omega_{M1}$	$\omega_{M2}$	$M_{\text{доп.}}$ , %	$\omega_{\text{доп.}}$ , °C/c	$M_{\text{доп.}}$ , %	$\omega_{\text{доп.}}$ , °C/c	$M_{\text{доп.}}$ , %	$\omega_{\text{доп.}}$ , °C/c
<i>Машиностроительные стали</i>										
1	20ХНЗА	Миним.	2,15	18	0	1,5	17,9	3,75	49,9	7,6
		Среднее	1,1	9,45	0	0,77	4,5	1,05	33	2,9
		Максим.	0,61	5,5	0	0,43	0	0,43	7	0,69
2	30ХМА	Миним.	2,15	18	0	1,55	0	1,5	5,7	2,3
		Среднее	2,35	20	0	1,7	0	1,7	5	2,35
		Максим.	1,55	13	0	1,15	0	1,15	2,7	1,35
3	25Х1МФ	Миним.	1,5	13,1	0	1,05	2,2	1,25	27	3,5
		Среднее	0,74	6,6	0	0,56	0	0,56	6	0,79
		Максим.	0,455	4,2	0	0,32	0	0,32	5,2	0,46

**Примечание.** «Миним.», «среднее» и «максим.» соответствуют минимальному, среднему и максимальному содержанию элементов в сталях в пределах марочного состава (см. табл. 10.28).

Свариваемость легированных сталей по основному показателю сопротивляемости ХТ при сварке необходимо оценивать с учетом всех факторов, приводящих к их образованию. Как указано выше, к ним относятся структура, размер аустенитного зерна, концентрация диффузионного водорода в зоне образования ХТ и остаточные сварочные напряжения. Подробная информация об этих факторах даны в разд. 1.5. Упомянутые факторы зависят от многих metallургических и конструктивно-технологических параметров (КТП) процесса изготовления сварных конструкций. При этом влияние последних не однозначно, а часто носят противоположный характер, например увеличение тепловой энергии сварки снижает содержание маргентита в структуре и в то же время приводит к росту аустенитного зерна. Поэтому оценка свариваемости возможна только на основе расчетного анализа формирования и развития факторов трещинообразования в условиях многовариантных сочетаний КТП. Такой анализ может быть выполнен с помощью инженерного программного комплекса (ИПК) «Свариваемость легированных сталей» (подробно см. в разд. 1.5).

Далее приводятся примеры расчета температуры сопутствующего подогрева, предотвращающего образование ХТ в ЗТВ при сварке некоторых сталей в зависимости от metallургических параметров и КТП процесса изготовления сварной конструкции. При этом показана возможность варьирования и выбора рациональных значений следующих параметров:

1) metallургических – состава стали, способа сварки, состава сварочных материалов, исходной концентрации диффузионного водорода в металле шва ( $H_{w0}$ ,  $\text{cm}^3/100 \text{ г Me}$ );

2) конструкционных – толщины ( $\delta$ , мм), угла разделки кромок ( $\alpha$ , °), длины сварного шва ( $L_w$ , мм), а также жесткости закрепления свариваемых элементов ( $R_f$ , МПа/мм), характеризующей сопротивление стыкового соединения поперечной усадке;

3) технологических – погонной энергии ( $q/V$ , Дж/см), времени между проходами ( $t_{m.p}$ , ч), числа и порядка раскладки сварных валиков ( $n_{val}$ , одно- или двухваликовые слои), температуры предварительного ( $T_{p.p}$ , °C) или сопутствующего подогревов ( $T_{c.p}$ , °C).

#### Пример 1. Исходные данные:

1) строительные стали группы 1; 8; 9 и машиностроительные группы 2 (см. табл. 10.28);

2)  $\delta = 20$  мм,  $\alpha = 54^\circ$ ,  $L_w = 1000$  мм, максимально жесткое закрепление свариваемых встык элементов на расстоянии 50 мм от оси шва ( $R_f = 4 \cdot 10^4$  МПа/мм);

3) вид сварки – автоматическая дуговая сварка под флюсом (АДСФ); погонная энергия  $q/V = 13\ 996, 23\ 328, 45\ 100$  и  $69\ 984$  Дж/см; число сварных валиков  $n = 12, 7, 4$  и 3 соответственно; первый слой одноваликовый, остальные двухваликовые; время перерыва между проходами  $t_{m.p} = 0,2$  ч; исходная концентрация диффузионного водорода в шве  $H_{w0} = 5$  и  $8 \text{ cm}^3/100 \text{ г}$ .

Температура сопутствующего подогрева  $T_{c.p.}$ , предупреждающая образование ХТ, принята за показатель стойкости ЗТВ сварных соединений против ХТ. Результаты расчета с помощью ИПК «Свариваемость легированных сталей» приведены на рис. 10.9, а и в.

**Пример 2. И с х о д н ы е д а н н ы е :**

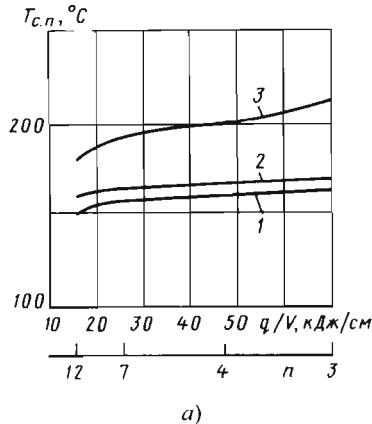
1) Строительные стали группы 1; 8; 9 и машиностроительные группы 2 (см. табл. 10.28);

2)  $\delta = 30 \text{ мм}, \alpha = 54^\circ, L_{\text{ш}} = 4458 \text{ мм}, R_f = 6 \cdot 10^4 \text{ МПа/мм};$

3) АДСФ:  $q/V = 13\ 996, 23\ 328, 45\ 100$  и  $69\ 984 \text{ Дж/см}; n = 25; 12; 8$  и 5 соответственно; исходная концентрация диффузионного водорода в шве  $H_{\text{ш}0} = 5$  и  $8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  соответственно;  $I_{\text{м.п.}} = 0$  (без перерывов); первый слой одноваликовый, остальные двухваликовые.

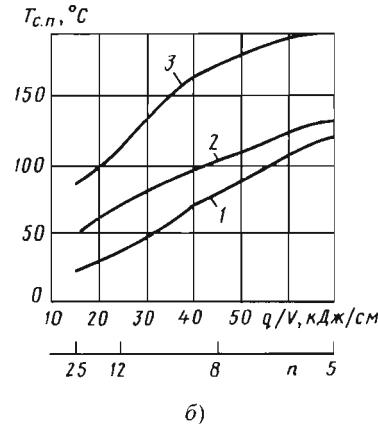
Определялась температура сопутствующего подогрева  $T_{c.p.}$ , предупреждающая образование ХТ.

Результаты расчета приведены на рис. 10.9, б и г.

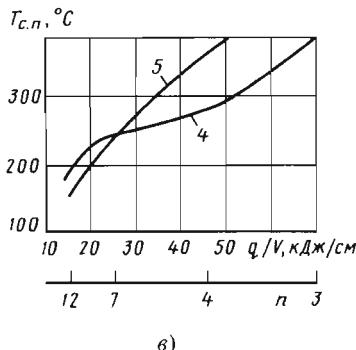


а)

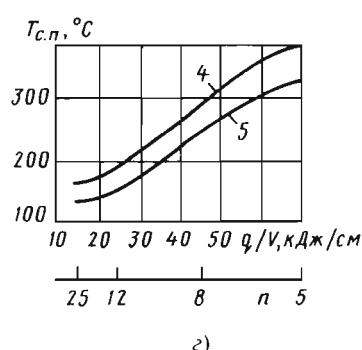
Приведенные примеры показывают, что увеличение погонной энергии  $q/V$  в случае многослойной сварки легированных сталей повышает требуемую температуру сопутствующего подогрева  $T_{c.p.}$ . Это можно объяснить влиянием величины погонной энергии сварки на отдельные факторы трещинообразования. Положительное влияние – снижение действительных скоростей охлаждения, усиление эффекта автоподогрева и, как следствие, уменьшение количества закалочных составляющих в структуре, ускорение десорбции диффузионного водорода из сварного соединения в период пребывания при высоких температурах. Негативное влияние – рост austенитного зерна, повышение уровня сварочных напряжений,



б)



в)



г)

**Рис. 10.9. Зависимость температуры сопутствующего подогрева  $T_{c.p.}$  от погонной энергии  $q/V$  многослойной автоматической сварки под флюсом легированных сталей:**

**а, б – стали 09Г2С; 12Х1МФ; 15Х2МФА (соответственно кривые 1, 2 и 3);**

**исходный водород в шве  $8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , толщина стали 20 и 30 мм соответственно;**

**в, г – стали 38ХН3МФА и 35ХГСА (соответственно кривые 4 и 5); исходный водород в шве  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , толщина стали 20 и 30 мм соответственно;  $n$  – число сварных валиков**

сокращение числа сварных валиков и, соответственно, увеличение их высоты. Последнее ухудшает условия развития процессов измельчения аустенитного зерна и самоотпуска в корневой зоне предыдущего валика. Одновременно ухудшаются условия десорбции диффузионного водорода из сварного соединения на этапе завершения охлаждения и в послесварочный период.

Анализ результатов компьютерных расчетов показывает, что  $T_{c,p}$  зависит от металлургических параметров и КТП производства сварных конструкций. Для каждого конкретного сочетания параметров существует только одно-единственное решение.

В руководящих документах различных отраслей промышленности приводятся рекомендации по подогреву свариваемых стыков низко- и среднелегированных сталей перед сваркой.

В табл. 10.32 приведена температура подогрева стыков труб перед сваркой дуговыми способами.

Как видно из таблицы 10.32,  $T_{c,p}$  назначена без учета многих КТП изготовления сварных конструкций: погонной энергии, количества сварных валиков, длины участков шва и т.п. Поэтому для многих сочетаний КТП указанные температуры могут оказаться излишне завышенными.

### 10.32. Температура подогрева стыков труб перед сваркой дуговыми способами при положительной температуре окружающего воздуха

Марка стали	Толщина, мм	Температура подогрева, °C
09Г2С	До 30	—
17Г1С	>30	100...150
12ХМФ	До 10	—
12Х2М1	10...30	200...250
	>30	250...300
15Х1М1Ф	До 10	—
20ХМФ	>10	300...350

## 10.3. СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

### 10.3.1. ХАРАКТЕРИСТИКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

К аустенитному классу относят высоколегированные стали, образующие при кристаллизации преимущественно однофазную аустенитную структуру  $\gamma$ -Fe с гранецентрированной кристаллической (ГЦК) решеткой и сохраняющие ее при охлаждении до криогенных температур. Количество другой фазы – высоколегированного феррита ( $\delta$ -Fe с объемноцентрированной кристаллической (ОЦК) решеткой) изменяется от 0 до 10 %. Они содержат 18...25 % Cr, обеспечивающего жаро- и коррозионную стойкость, а также 8...35 % Ni, стабилизирующего аустенитную структуру и повышающего жаропрочность, пластичность и технологичность сталей в широком интервале температур. Это позволяет применять аустенитные стали в качестве коррозионно-стойких, жаропрочных, жаростойких и криогенных конструкционных материалов в теплоэнергетических, химических и атомных установках, где они подвергаются совместному действию напряжений, высоких температур и агрессивных сред. Химический состав основных жаропрочных и коррозионно-стойких сталей приведен в табл. 10.33 и 10.34.

В аустенитных сталях наряду с хромом и никелем могут находиться в твердом растворе или избыточных фазах и другие легирующие элементы: аустенитизаторы (углерод, азот, марганец) и ферритизаторы (титан, ниобий, молибден, вольфрам, кремний, ванадий), улучшающие указанные служебные свойства и действующие на стабильность аустенитной структуры эквивалентно хрому и никелю.

Ферритизаторы способствуют формированию высоколегированного феррита ( $\delta$ -Fe) с ОЦК-решеткой; аустенитизаторы стабилизируют аустенитную структуру ( $\gamma$ -Fe) с ГЦК-решеткой.

Эквивалентное содержание хрома и никеля (в %) подсчитывают по следующим формулам:

$$\text{Cr}_{\text{экв}} = \% \text{ Cr} + 2(\% \text{ Mo} + \% \text{ Nb} + \% \text{ Al}) +$$

$$+ 1,5(\% \text{ Si} + \% \text{ W}) + 5 \cdot \% \text{ Ti} + 1 \cdot \% \text{ V};$$

$$\text{Ni}_{\text{экв}} = \% \text{ Ni} + 0,5 \% \text{ Mn} + 30(\% \text{ C} + \% \text{ N}).$$

**10.33. Химический состав и применение аустенитных жаропрочных сталей для сварных конструкций**

Марка стали	Массовая доля, %										Применение	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Nb	Mo	Ti	прочих элементов		
08Х16Н9М2	0,08	0,60	1,0...1,5	15,5...17,0	8,5...10,0	-	0,9...1,3	1,0...1,5	-	-	Паропроводы	
10Х14Н16Б (ЭП 694)	0,07...0,12		1,0...2,0	13,0...15,0	14,0...17,0			-	0,02			
10Х18Н12Т	0,12	0,75		17,0...19,0	11,0...13,0							
10Х14Н14В2М (ЭП 257)	0,15	0,80	0,70	13,0...15,0	13,0...16,0	3,0...4,0	-	0,45...0,60	-	0,005 В	Трубы, по-ковки	
10Х16Н14В2БР (ЭП 17)	0,07...0,12	0,60	1,0...2,0	15,0...18,0	13,0...15,0	2,0...2,75	0,9...1,3	-	1,1	0,005...0,020 В	Трубы, листовой прокат	
09Х14Н18ВБР (ЭП 695Р)					13,0...15,0							
10Х15Н18В4Т (ЭП 501)		0,50	0,5...1,0	14,0...16,0	18,0...20,0	4,0...5,0	-	-	1,6	0,005...0,025 В	Паропроводы	
10Х14Н18В2БР1 (ЭП 726)		0,60	1,0...2,0	13,0...15,0		2,0...2,75	0,9...1,3					
20Х23Н13 (ЭП 319)	0,20	1,0	2,0	22,0...25,0	12,0...15,0	-	-	-	-	0,025 В	Камеры сгорания	
08Х23Н18	0,1				17,0...20,0					-		
1Х15Н25М6А (ЭП 395)	0,12	0,5...1,0	1,0...2,0	15,0...17,0	24,0...27,0					0,1...0,2 В	Роторы газовых турбин	
40Х18Н25С2 (ЭЯ3С)	0,32...0,4	1,5	2,0...3,0	17,0...19,0	23,0...26,0					-	Литые реакционные трубы	
20Х25Н20С2 (ЭП 283)	0,2	2,0...3,0	1,5	24,0...27,0	18,0...21,0					-		
10Х12Н20Т3Р (ЭП 696А)	0,10	1,0	1,0	10,0...12,5	-	-	-	-	2,3...2,8	Паропроводы		
10Х15Н35ВТ (ЭП 612)	0,12	0,6	1,0...2,0	14,0...16,0					34,0...38,0		0,5...0,008 В	
Х15Н35ВТР (ЭП 725)	0,10		1,0	14,0	35,0...38,0				2,8...3,5	1,1...1,5	Роторы турбин	
					4,0...5,0				0,25...0,005 В			

## 10.34. Химический состав коррозионно-стойких сталей (по ГОСТ 5632-72)

Тип легирования	Массовая доля, %								Коррозионная стойкость		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti = xC - yД	Mo	S	P		
	не более										
Хромоникелевый:	$\leq 0,08$	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	$17,0\dots19,0$			$-$	$0,02$	$0,035$	Первый балл стойкости ( $I_{sp}$ до 0,1 мм/год) в 65%- и 80%-ной азотной кислоте при температурах соответственно до 85 и 65 °C; 100%-ной серной кислоте при температуре до 70 °C; смеси азотной и серной кислот (25 % HNO <sub>3</sub> , 70 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; 10 % HNO <sub>3</sub> + 60 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) при 60 °C, 40%-ной фосфорной кислоте при 100 °C	
08Х18Н10							9,0…11,0	5С – 0,7			
08Х18Н10Т							5С – 0,8				
12Х18Н10Т							10,5…12,5				
03Х18НП							10,0…12,0				
06Х18Н11							11,0…13,0	Nb – 10С – 1,1			
Хромомарганцовый и хромоникелемарганцововый:	$\leq 0,10$	$\leq 0,8$	$13,0\dots15,0$	$13,0\dots16,0$	$2,8\dots4,5$	$5(C - 0,02) - 0,6$	$0,02$	$0,035$	Первый балл стойкости в ряде кислот высоких концентрации и температуры (5…10%-ной азотная кислота до 80 °C; 58- и 65%-ная азотная кислота при 20 °C; 10%-ная уксусная кислота до 80 °C; 10%-ная фосфорная кислота до 80 °C), моющих средствах, водопроводной воде при 85 °C и в ряде других сред		
10Х14Г14Н4Т											
10Х14АГ15											
07Х21Г7АН5											
Хромоникельмolibденовый:	$\leq 0,08$	$\leq 0,8$	$\leq 2,0$	$16,0\dots18,0$			$2,5\dots3,5$	$0,020$	$0,035$	Первый балл стойкости в 50%-ной лимонной кислоте при $T_{min}$ 10%-ной муравьиной кислоте до 100 °C; 5-, 10- и 25%-ной серной кислоте до 75 °C; 50%-ной уксусной кислоте до 100 °C и в других средах	
08Х17Н13М2Т							5С – 0,7				
10Х17Н13М3Т							3,5…4,0				
08Х17Н15М3Т							0,3…0,6	3,0…4,0			
03Х16Н15М3		$\leq 0,6$		$15,0\dots17,0$				2,5…3,5	0,015	0,020	
03Х21Н21М4ГБ				$\leq 1,8\dots2,5$	$20,0\dots22,0$	$20,0\dots22,0$	Nb – 15С – 0,8	3,4…3,7	0,020	0,030	
Высококремнистый:	$\leq 0,02$	$5,4\dots6,7$	$\leq 0,6$	$7,5\dots10,0$	$21,0\dots23,0$	$-$	$0,13\dots0,35\text{ A1}$	$0,02$	$0,025$	Первый балл стойкости в азотной кислоте концентрацией >90 % при температуре 100 °C (02Х8Н22С6) и до 50 °C (15Х18Н12С4ГБ)	
02Х8Н22С6*											
15Х18Н12С4ГБ		$0,12\dots0,17$	$3,8\dots4,5$	$0,5\dots1,0$	$17,0\dots19,0$	$11,0\dots19,0$	$0,4\dots0,7$		$0,03$	$0,035$	

\* Содержание титана зависит от количества углерода, азота и ниобия в металле и рассчитывается по формуле, указанной в шапке таблицы, где Д – другие.

Совместное действие легирующих элементов на конечную структуру оценивают по соотношению  $\text{Cr}_{\text{экв}}/\text{Ni}_{\text{экв}}$ , называемому хромоникелевым эквивалентом, и с помощью структурных диаграмм Шеффлера (рис. 10.10). На этой диаграмме структура стали определяется соотношением координат  $\text{Cr}_{\text{экв}}$  и  $\text{Ni}_{\text{экв}}$ . Стали, попадающие в области А, Ф и М, имеют стабильно аустенитную, ферритную или мартенситную конечную структуры соответственно. Стали, попадающие в переходные области А + Ф, А + М, А + М + Ф, обладают смешанной структурой. Соотношение А + Ф дифференцировано количественно с помощью ряда веерообразно расположенных линий. Цифры над этими линиями указывают количество высоколегированного феррита ( $\delta$ -Fe с ОЦК-решеткой), содержащегося в стали наряду с аустенитом ( $\gamma$ -Fe). Эта структурная диаграмма описывает структуры, получаемые после кристаллизации металла сварного шва. Для других состояний металла (прокат, поковка, литье) существуют аналогичные диаграммы, количественно отличающиеся от приведенной на рис. 10.10.

Более точно определяют остаточное количество  $\delta$ -Fe по ферритному числу с помощью формулы:

$$\text{FN} = -18 + 2,9(\% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 0,3 \% \text{Si}) - 2,6(\% \text{Ni} + 35 \% \text{C} + 20 \% \text{N} + 0,3 \% \text{Mn}).$$

где FN – ферритное число, приблизительно равное процентному содержанию  $\delta$ -Fe.

Обладая одновременно жаропрочными и антикоррозионными свойствами, аустенитные

стали получают то или иное сверхвысокое свойство принципиально различным легированием и термической обработкой. В связи с этим различают две основные группы аустенитных сталей: жаропрочные: коррозионностойкие.

### 10.3.2. СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Жаропрочность – сопротивление стали разрушению при высокой температуре, зависящее не только от температуры, но и от времени. Механизм разрушения металла при высокотемпературном длительном нагружении имеет диффузионную природу и состоит в развитии дислокационной ползучести. Под действием температуры, времени, напряжений дислокации у барьера, создавшие упрочнение, приходят в движение (совместно с облаком легирующих элементов и примесей) в результате взаимодействия с созданными нагревом подвижными вакансиями, которые обеспечивают их «переползание» в другие плоскости кристаллической решетки на границы зерен. Это приводит к разупрочнению, развитию локальной пластической деформации и охрупчиванию. Дислокации, выходящие на границы зерен, создают микроступеньки и вызывают из-за соответствующего изменения размеров контактирующих зерен межзеренное проскальзывание, раскрывающее микроступеньки в поры и трещины, чему способствуют потоки вакансий. В этих условиях прочность и пластичность металла зависят от температуры и времени, т.е. от длительности нагружения. Для предотвращения ползучести жаропрочность повышают двумя основными способами:

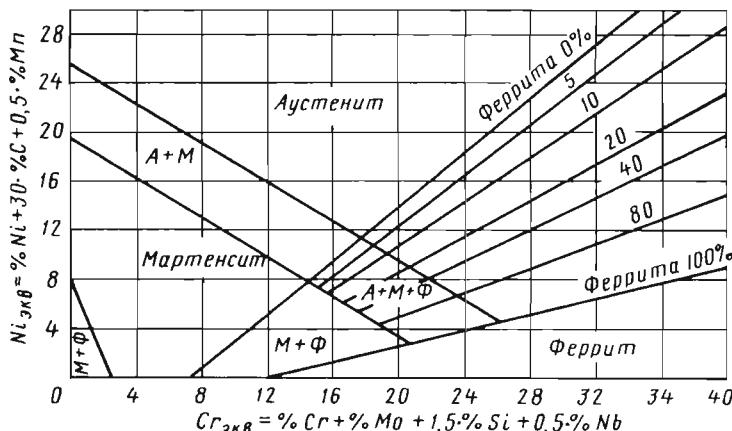


Рис. 10.10. Структурная диаграмма Шеффлера для определения фазового состава аустенитных швов

— ограничением диффузионной подвижности вакансий (легирование  $\gamma$ -твердого раствора молибденом, вольфрамом и другими элементами);

— созданием большого количества термостойких дисперсных включений-барьеров, препятствующих переползанию и скольжению дислокаций. Эту роль выполняют карбиды и интерметаллиды. Соответственно жаропрочные стали (см. табл. 10.33) разделяют на гомогенные нетермоупрочняемые и гетерогенные, упрочняемые термообработкой.

Коррозионная стойкость сталей — сопротивление металла воздействию агрессивных сред. Химические составы коррозионно-стойких сталей, приведенные в табл. 10.34, разработаны с учетом двух видов коррозии: химической и электрохимической.

Под химической коррозией понимают окисление металлов в неэлектропроводной среде (струе горячих газов и т.п.). Она развивается, если образующиеся продукты коррозии более чем в 2,5 раза увеличиваются в объеме, что приводит к их периодическому отслаиванию и утонению деталей. Стали, содержащие  $>12\%$  Cr, образуют прочную пленку оксидов, препятствующую проникновению окислителя в металл, что обеспечивает их окалино- и жаростойкость. Наиболее жаростойкие стали, содержащие наряду с хромом кремний и алюминий.

Под электрохимической коррозией понимают растворение металла в жидкых электропроводных растворах кислот и расплавах, содержащих ионы с положительным и отрицательным зарядами ( $H_2^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  и др.). Наиболее опасны межкристаллитная и структурно-избирательная коррозии, развивающиеся по границам зерен. При контакте металла с электропроводным раствором термодинамически обусловлен и неизбежен переход ионов  $Fe^+$  из дефектных мест кристаллической решетки в раствор, что создает на металле отрицательный заряд и разность потенциалов между металлом и электролитом, препятствующую дальнейшему растворению (поляризация). Однако в других местах контактной поверхности в результате электропроводности металла и раствора действуют электростатические силы, приводящие к оседанию на поверхности металла положительно заряженных ионов ( $H_2^{2+}$  и др.), образующих нейтральные молекулы  $H_2$ . Это вызывает деполяризацию и непрерывное действие

гальванической пары: металл (−) — раствор (+), т.е. коррозии. Скорость коррозии хрома в кипящей 65%-ной кислоте  $5 \cdot 10^{-2} \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , а железа —  $10^5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , т.е. в  $10^7$  раз выше.

Поэтому при наличии в стали хрома коррозия практически не развивается. Главный фактор коррозионной стойкости стали — однородность твердого раствора хрома в железе, отсутствие его соединений с углеродом и другими элементами, приводящих к локальному обеднению стали хромом и создающих границы раздела между фазами с дефектными участками кристаллической решетки, где у атомов железа ослаблены межатомные связи. Так, образование карбида хрома  $Cr_{23}C_6$ , содержащего 94 % Cr, обедняет окружающую матрицу с 18...25 % Cr. Поэтому составы коррозионно-стойких сталей отличаются от жаропрочных минимумом углерода (до 0,02 %), являющегося для них вредной примесью, либо наличием в стехиометрическом отношении стабилизирующих элементов (титан, ниобий), образующих более прочные карбиды, чем хром, что исключает обеднение твердого раствора хромом. Для обеспечения прочности и стабильности аустенита в ряде сталей часть углерода заменена азотом. Он препятствует образованию  $\delta$ -Fe, упрочняет аустенит и не образует карбидов.

Кроме того, в рассматриваемых сталях снижены пределы содержания серы и фосфора. В ряде сталей допустимо  $\leq 10\%$   $\delta$ -Fe, который обладает высокой концентрацией хрома и повышает коррозионную стойкость при нормальных температурах, но охрупчивает сталь при длительном нагреве до температуры  $>500^\circ\text{C}$ , превращаясь в  $\sigma$ -фазу, что снижает и коррозионную стойкость.

### 10.3.3. СВАРИВАЕМОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Исходя из табл. 10.33 и рис. 10.11 аустенитные стали имеют в основном метастабильную однофазную структуру, в которой карбидные и интерметаллидные фазы претерпевают существенные изменения при сварке плавлением. Наряду с особенностями структуры, существенно отличаются аустенитные стали от перлитных и по теплофизическим свойствам (табл. 10.35). Они имеют существенно меньшую температуру плавления (на  $100^\circ\text{C}$ ), в 3 раза меньшую теплопроводность, но больший коэффициент термического расширения и

### 10.35. Теплофизические свойства конструкционных сталей и сплавов

Свойства	Тип стали (сплава)			
	Ст3	18-8	25-20	20-80
Температура плавления, К	1500	1400...1425	1383...1410	1390
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	0,42	0,5	0,45...0,63 (в интервале 100...900 °C)	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	40,3	16,3	12,6...16,8	12,2 (при 100 °C)
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/°C при нагреве:				
– от 0 до 100 °C	12,0	17,3	15,0	11,7
– от 0 до 500 °C	13,4	18,5	18,0	13,5
Электросопротивление при 20 °C, Ом · мм <sup>2</sup> /м	0,15	0,73	1,24	
Температура начала интенсивного окалинообразования, К	820	1100...1150	1406	1300
Предел, МПа:				
– прочности	≥380	≥550	≥600	≥1000
– текучести	≥210	≥200	≥300	≥600

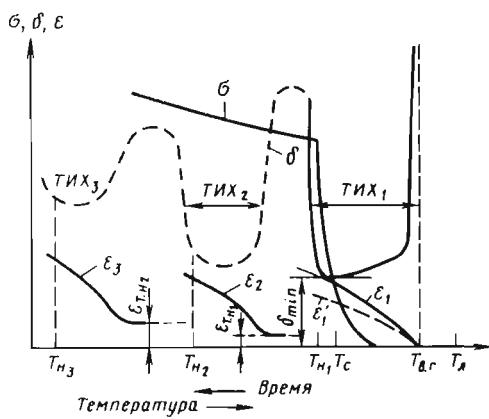


Рис. 10.11. Изменение механических свойств сплавов в процессе кристаллизации шва и последующего охлаждения:

$T_{\text{л}}$  и  $T_{\text{с}}$  – температуры ликвидуса и солидуса;  $\sigma$ ,  $\delta$  и  $\varepsilon$  – прочность, пластичность и деформация металла соединения соответственно;  $T_{\text{в.г.}}$ ,  $T_{\text{н}_1}$ ,  $T_{\text{н}_2}$ ,  $T_{\text{н}_3}$  – верхняя и нижние границы ТИХ<sub>1</sub>, ТИХ<sub>2</sub>, ТИХ<sub>3</sub>.

значительно большее электростатическое сопротивление (в 5 раз), а также лучше прочность и релаксационную стойкость при повышенных температурах. Это вызывает повышение временных и остаточных напряжений в сварных соединениях, в том числе при термической обработке (отпуск), а также при эксплуатации в условиях теплосмен. Указанные факторы обуславливают ограниченную свариваемость, так как затрудняют сохранение механических и химических свойств при сварке и вызывают высокую склонность к образованию горячих трещин (ГТ) различной природы: кристаллизационных, подсолидусных, ликвационных, а также трещин при термообработке и эксплуатации.

#### 10.3.3.1. ПРИРОДА И ПРИЧИНЫ ГТ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

Кристаллизационные трещины возникают в твердожидком состоянии на завершающем этапе кристаллизации по зонам срастания кристаллитов, обогащенных легкоплавкими ликвациями в температурном интервале хрупкости

(ТИХ<sub>1</sub>), т.е. в районе неравновесного солидуса (см. рис. 10.11). Склонность к трещинам возрастает при увеличении ТИХ<sub>1</sub>, снижении пластичности в ТИХ<sub>1</sub>, а также при росте темпа растягивающих деформаций в ТИХ<sub>1</sub>, совместно приводящих к исчерпанию пластичности ( $\varepsilon > \delta_{min}$ ) и образованию трещин. Эти факторы структурно-чувствительны. Структура металла шва и ЗТВ зависит от химического состава и теплофизических условий кристаллизации. Роль химического состава в первом приближении оценивают по псевдобинарным диаграммам состояния системы Fe – Cr – Ni при постоянном содержании железа (рис. 10.12). Согласно этой диаграмме в стабильно аустенитных сталях с соотношением  $Cr_{жв}/Ni_{жв} < 1,12$  кристаллизация протекает путем выделения из жидкости  $\gamma$ -твердого раствора до полного исчезновения жидкой фазы. При большем соотношении  $Cr_{жв}/Ni_{жв} < 1,3$  в интервале температур между ликвидусом и солидусом последовательно выделяются из жидкости две твердые фазы: аустенит и междендритный эвтектический феррит, который образуется из последних порций жидкой фазы, обогащенной хромом и никелем по ликвидационному механизму.

В условиях ускоренного охлаждения при сварке швы состоят из крупнокристаллической матрицы с остаточным ферритом в виде замкнутых выделений по тройным стыкам границ дендритных ячеек. Несмотря на наличие этого

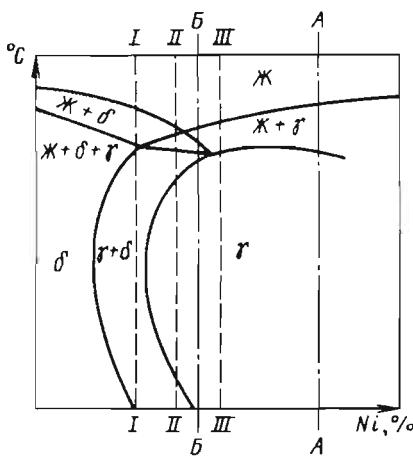


Рис. 10.12. Псевдобинарная диаграмма плавкости аустенитных сталей при изменении соотношения  $Cr_{жв}/Ni_{жв}$ . Превращения при нагреве:

I – I –  $\gamma + \delta$  – нет; II –  $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta'$ ;

III – III –  $\gamma$  – нет

феррита, стали указанных составов претерпевают, по существу, однофазную кристаллизацию, что приводит: к формированию крупных кристаллитов со слабо развитыми осями второго порядка, значительной ликвации серы и фосфора по границам и весьма малой пластичностью в ТИХ<sub>1</sub>. Наиболее крупное кристаллическое строение имеет центр шва, куда в результате конкурентного роста выклинивается и прорастает ограниченное число кристаллитов (рис. 10.13). Швы с такой структурой наиболее склонны к ГТ кристаллизационного вида.

Принципиальные изменения в формировании шва получают стали, у которых соотношение  $Cr_{жв}/Ni_{жв} > 1,3$ . В этих сталях ведущей фазой при кристаллизации является феррит. Из него формируется осевая часть дендритных ячеек, где вследствие ликвации меньше никеля. Этот феррит называется вермикулярным, т.е. преобладающим. Остальная часть жидкой фазы образует  $\gamma$ -твердый раствор. В результате

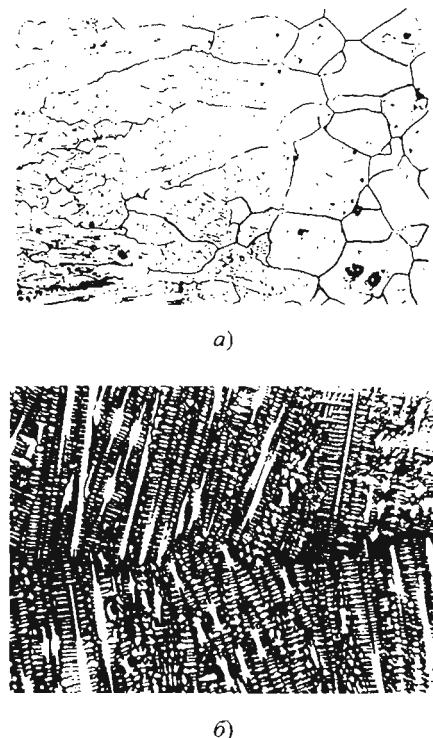


Рис. 10.13. Микроструктура в зоне зарождения кристаллитов шва на оплавленных зернах основного металла (а) и в зоне их срастания лобовыми гранями (в центре шва) (б).

Увеличение 200<sup>х</sup>

высокого градиента температур, совместной кристаллизации феррита и аустенита образуются столбчатые кристаллиты с весьма развитой дендритной формой и высокой дисперсностью (рис. 10.14). Кроме того, в междендритных пространствах, обогащенных хромом, возникает большое количество эвтектического феррита, который образует сложные, весьма разветвленные участки по зонам срастания столбчатых кристаллитов с осями второго и третьего порядков и практически исключает образование кристаллизационных трещин, повышая пластичность в ТИХ<sub>1</sub>. После замедленного охлаждения в швах этого состава сохраняется 5...6 % остаточного феррита. Остальной феррит преобразуется в аустенит в твердофазном состоянии. Такой шов приобретает однофазную аустенитную структуру после длительной высокотемпературной (1150 °C) термической обработки – аустенитизации.

Наряду с химическим составом в формировании структуры швов существена роль теплофизических условий кристаллизации. Она состоит в их влиянии на зарождение, форму кристаллитов и физико-химическую неоднородность. Для аустенитных сталей, не претерпевающих перекристаллизации при нагреве, весьма важны исходная структура стали, степень нагартовки и размер зерна. Выросшие на этапе аустенитизации либо сварочного нагрева зерна частично оплавляются на линии сплавления и служат плоскими зародышами для кристаллизации металла (см. рис. 10.13, а). Рост этих зародышей происходит на конкурентной основе, когда благоприятно ориентированные зародыши увеличиваются, укрупняя зернистую структуру в центре шва (см. рис. 10.13, б). Направление роста кристаллитов зависит от режима сварки и формы сварочной ванны.



Рис. 10.14. Микроструктура аустенитного шва, содержащего 5...6 % δ-Fe, увеличение 200<sup>×</sup>

Кристаллиты растут скачками, по мере нарастания термоконцентрационного переохлаждения; направление роста аустенитно-ферритных швов соответствует закону ортогональности к изотермической межфазной поверхности, что постепенно изменяет направление роста кристаллитов на 90° и измельчает их в центре шва. По мере увеличения скорости сварки степень изгиба осей кристаллитов снижается, что приводит к встречному росту и срастанию кристаллитов в центре шва передними гранями. Напротив, однофазным швам свойственны отклонения от ортогональности на любых режимах, образование «осевых» кристаллитов, значительная ликвация. Это главные структурные причины их высокой склонности к образованию ГТ в ТИХ<sub>1</sub>.

В ЗТВ аустенитных сталей происходят по мере повышения температуры следующие необратимые изменения:

- рекристаллизация обработки и рост зерна в зоне нагрева >1000 °C, приводящий к разнозернистости и разупрочнению металла (особенно неравномерно растет зерно в гомогенных сталях, находившихся перед сваркой в состоянии наклепа на 5...15 %);

- образование δ-Fe;

- коагуляция, растворение избыточных упрочняющих фаз;

- формирование граничных сегрегатов как результат миграции границ при росте зерен с последующим расплавлением границ и образованием легкоплавкой карбидной эвтектики, также вызывающей ГТ в ЗТВ, которые в литературе принято называть ликвационными. Они могут иметь место и в швах при многопроходной сварке.

В ТИХ<sub>1</sub> ликвационного типа ГТ весьма вероятны в шве и ЗТВ при сварке жаропрочных сталей, содержащих титан, ниобий, бор и другие легирующие элементы, образующие легкоплавкие карбидные эвтектики сложного состава, что увеличивает ТИХ<sub>1</sub>.

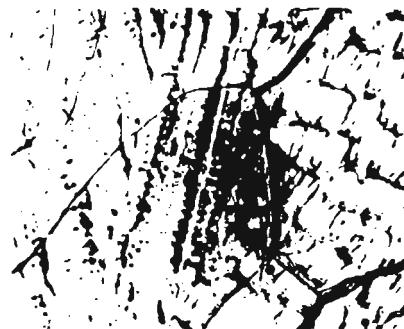
При сварке коррозионно-стойких сталей, отличающихся большой гомогенностью, более вероятно образование подсолидусных ГТ, рождающихся в твердофазном состоянии непосредственно после затвердевания, если наблюдается снижение пластичности, т.е. ТИХ<sub>2</sub>. Его образование вызывается неравновесностью, зафиксированной кристаллизацией, которая в

сплавах с высокой диффузионной подвижностью атомов основы на этапе охлаждения может релаксировать миграцией границ кристаллитов в более равновесные положения диффузионным путем. Миграция границ в новые положения приводит к накоплению на них примесей, а продолжающаяся при охлаждении пластическая деформация инициирует выход дислокаций на границы совместно с облаком легирующих элементов и примесей. (Это явление называют «дислокационным транспортом».)

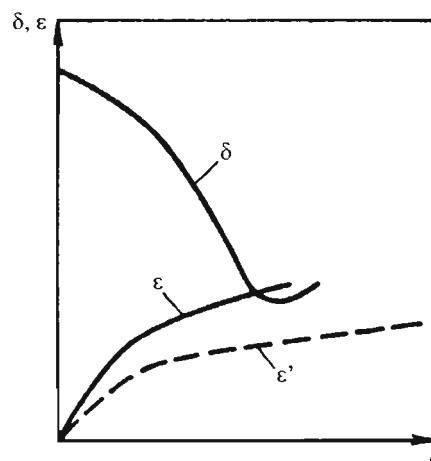
Границы зерен, сформированные в шве в результате миграции, как правило, не совпадают с зонами срастания кристаллитов, выявляемыми по следам дендритной кристаллизации (рис. 10.15). Их легко обнаруживают тепловым или химическим травлением из-за высокого уровня сегрегации, развивающейся по вышеуказанным механизмам вследствие пересыщения металла ростовыми и тепловыми вакансиями, контролирующими диффузию атомов основы (миграцию границ) и движение дислокаций. В результате выхода дислокаций на границу формируются ступеньки и изменяются размеры зерен по линии их контакта, вызывающие межзеренное проскальзывание, которое раскрывает ступеньки в поры и трещины, развивающиеся в дефект с помощью притока вакансий.

Металл шва в таком состоянии имеет малую пластичность в интервале 1200...900 °C (ТИХ<sub>2</sub>), что при действии сварочных деформаций приводит к образованию твердофазных ГТ диффузионно-дислокационной природы, также называемых подсолидусными (см. рис. 10.15, а). Наиболее часто они возникают при многопроходной сварке толстолистового металла, когда повторный дуговой нагрев вызывает пластическую деформацию в металле шва предыдущего прохода вследствие релаксации сварочных напряжений, а также нагревает его до околосолидусных температур, инициируя диффузионные процессы, снижающие пластичность.

Ускоренное охлаждение шва, легирование металла элементами (марганец, молибден, азот), повышающими энергию активации процессов диффузии и снижающими энергию дефектов упаковки (частичных или разорванных дислокаций), подавляет развитие высокотемпературной дислокационной ползучести и предотвращает образование ГТ в ТИХ<sub>2</sub>.



а)



б)

**Рис. 10.15. Микроструктура металла многопроходного шва в районе ГТ по границе зерна на фоне элементов кристаллизационной дендритной структуры. Металл шва – сталь 08X18H10Г6Т, увеличение 500<sup>а</sup> (а); изменение пластичности  $\delta$  и развитие деформаций  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  в процессе термообработки сварных соединений сталей, подверженных дисперсионному упрочнению (б)**

#### 10.3.3.2. ТРЕЩИНЫ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ СОЕДИНЕНИЙ

При термической обработке жестких сварных узлов, имеющих концентраторы напряжений (непровары, подрезы, трещины и пр.), из жаропрочных сталей, содержащих карбидообразующие элементы (титан, ниобий, молибден), на этапе нагрева в интервале температур 650...800 °C возможно образование трещин по следующим причинам:

– сосредоточению в ЗТВ деформаций металла, вызываемых релаксацией сварочных напряжений и повышенной прочностью шва; их накопление в процессе отпуска показано на рис. 10.15, б линиями  $\epsilon$  и  $\epsilon'$ ;

– необратимым изменениям при сварке в ЗТВ (рост зерен, сегрегация, оплавление границ, формирование из ликвиков плоских карбидов по границам, обеднение периферии аустенитных зерен хромом и соответственно снижение сопротивления ползучести в металле ЗТВ);

– дисперсионному твердению объемов зерен в процессе медленного нагрева и деформирования при термообработке в интервале температур 600...800 °C, что интенсивно снижает пластичность в связи с упрочнением объемов зерен, переходом деформации к схеме межзеренного проскальзывания (линия  $\delta$ ). Исчертание пластичности (пересечение линий  $\delta$  и  $\epsilon$ ) в процессе термообработки в зоне концентрации деформаций вызывает образование трещины. Такой механизм охрупчивания металла наблюдается в интервале температур 600...800 °C, т.е. в ТИХ<sub>3</sub> – дисперсионного твердения (см. рис. 10.11). Длительный нагрев металла шва и ЗТВ в интервале 600...800 °C возникает при ЭШС, а также дуговой многоходной сварке толстостенного металла, когда отдельные слои многократно нагреваются до сенсибилизационных температур (рис. 10.16) и медленно деформируются. Это усиливает диффузионные процессы, приводя-

щие к выделению избыточного углерода из твердого раствора по линии OSE (рис. 10.17), образованию карбидов, сегрегации примесей, что вызывает под действием напряжений охрупчивание в условиях высокотемпературной ползучести.

Наиболее вероятны трещины при отпуске сварных конструкций из легированных титаном и ниобием жаропрочных сталей (12X18H10T, X18H9B, X15H35B3T). Стали типов X16H9M2 и 08X16H13M2Б, не содержащие титана, менее склонны к дефектам этой природы.

#### 10.3.3.3. ОХРУПЧИВАНИЕ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Различают высокотемпературное и радиационное охрупчивание. В металле швов аустенитных сталей, содержащих некоторое количество (8...10 %) ферритной фазы, при длительном нагреве в интервале температур 300...500 °C происходит охрупчивание, получившее название 475-градусной хрупкости. Она имеет обратимый характер и устраняется при кратковременном нагреве до 550 °C.

При длительном нагреве до 650...900 °C металла шва, содержащий ферритную фазу, охрупчивается вследствие ее распада, приводящего к выделению карбида на границе  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз и образованию интерметаллида FeCr –  $\sigma$ -фазы по схеме:  $\delta\text{-Fe} \rightarrow M_{23}C_6 + \sigma$  (Fe, Cr). Этот процесс обедняет хромом периферию зерен и создает опасность коррозионного рассекивания в агрессивной среде.

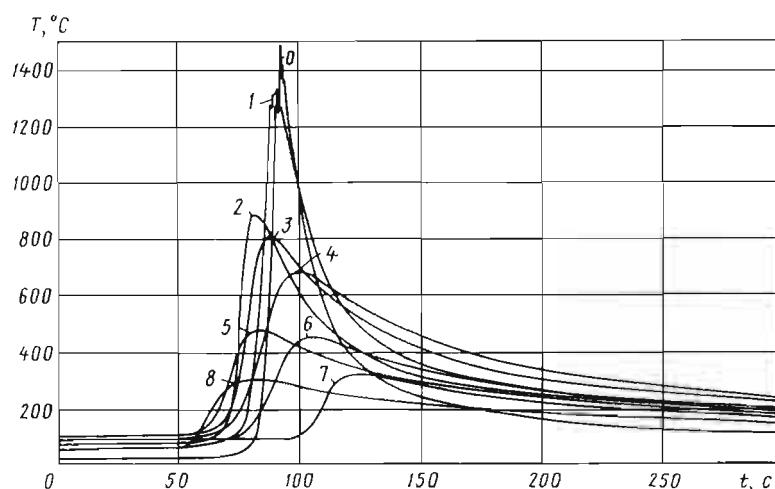


Рис. 10.16. Термические циклы в корне шва при многопроходной сварке

стали 08Х18Н10Т толщиной  $\delta = 16$  мм:

0 – корень шва; 1 – 8 – соответственно первый – восьмой швы

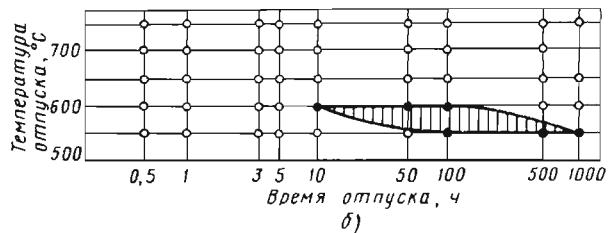
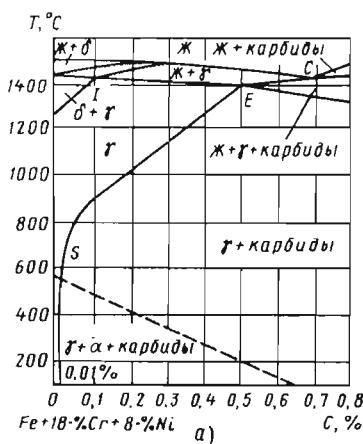


Рис. 10.17. Снижение растворимости углерода в аустените при понижении температуры (а); температурно-временной интервал выделения карбидов при сенсибилизационном нагреве аустенитизированной стали 12Х18Н10Т (б).  
Заштрихованы области максимальной чувствительности к межкристаллитной коррозии

Послесварочная гомогенизация швов, содержащих  $\delta$ -Fe, по режиму аустенитизации снижает скорость этого охрупчивания, а также восстанавливает пластичность сigmatизированного шва. Швы с аустенитно-карбидной и боридной структурами имеют большую стабильность свойств в процессе длительной высокотемпературной эксплуатации (до 1000 ч при 700 °C). Швы с однофазной структурой, легированные молибденом, также обнаруживают снижение ударной вязкости при 650...750 °C в течение  $5 \cdot 10^3$  ч, что связано с выпадением дисперсных вторичных фаз.

В металле ЗТВ аустенитных сталей при высокотемпературной эксплуатации в интервале 550...700 °C имеет место склонность к локальным разрушениям околошововой зоны (ЛРОЗ). Они аналогичны трещинам, образующимся в ЗТВ при термической обработке, но возникают при циклическом нагружении в условиях теплосмен и концентрации деформаций в ЗТВ, когда металл шва более жаропрочен, чем металл в ЗТВ, претерпевший оплавление по границам зерен и выпадение карбидов из ликватов. При медленном нарастании деформации в ОШЗ развивается ползучесть, наблюдаются межзеренное проскальзывание по сегрегированным границам зерен и зарождение трещин (рис. 10.18).

Радиационное охрупчивание имеет место в конструкциях из аустенитных сталей, длительно находящихся в активных зонах ядерных реакторов, где они подвергаются нагреву и нейтронному облучению, что приводит к охрупчиванию металла и снижению его свариваемости в этом состоянии.



Рис. 10.18. Микроструктура многопроходного соединения в районе локального разрушения стали 08Х18Н10Т толщиной  $\delta = 12$  мм при температуре 650 °C. Увеличение 50<sup>×</sup>

Под воздействием нейтронов,  $\alpha$ -частиц в кристаллической решетке металлов образуются в результате ядерных реакций трансмутации атомы водорода, гелия, а также вакансии, поскольку атомы твердого тела выбиваются из своих регулярных положений и переходят в междуузлия; это повышает прочность и снижает пластичность основного металла и особенно сварных швов. В гомогенных сталях указанные неблагоприятные изменения механических свойств могут быть устранены при нагреве до  $0,5T_{\text{пл}}$ , где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления.

Для дисперсионно-твердеющих сталей, содержащих цветные металлы (кобальт, бор, никель, титан, алюминий), изменения наиболее существенны. Особенно резко при облучении снижается длительная прочность, которая не восстанавливается после соответствующего нагрева. Большую работоспособность в условиях нейтронного облучения имеют стали типа 25-20 с ниобием ( $Nb \geq 10\% C$ ) или стали типа 15-35 с малым содержанием углерода ( $\leq 0,02\% C$ ).

Свариваемость облученных сталей (сварка необходима при ремонте агрегатов) значительно ниже, чем у необлученных. Имеют место пористость в результате выхода в литой металл водорода и гелия, а в ЗТВ – ГТ по механизму гелиевой хрупкости.

При выборе химических составов сварочных материалов следует учитывать требования по обеспечению как свариваемости, так и работоспособности соединений под радиационным воздействием.

#### 10.3.3.4. ХРУПКИЕ РАЗРУШЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

При эксплуатации сварных соединений в агрессивных средах наиболее опасна межкристаллитная коррозия металла шва и ЗТВ в двух ее разновидностях: ножевая коррозия в ЗТВ и коррозионное растрескивание под напряжением.

Ножевая коррозия поражает слой металла ЗТВ в зоне максимального нагрева  $\geq 1250^{\circ}\text{C}$ . При этом нагреве, существенно превышающем температуру аустенитизации, происходит рост зерна диффузионным путем, что приводит к обогащению границ зерен элементами с малой диффузионной подвижностью и оплавлению границ, фиксируемому снижением прочности до нулевых значений. По убыванию скорости объемной диффузии легирующие элементы располагаются в следующий ряд: молибден, кремний, хром, марганец, титан. Следовательно, в титаносодержащей стали следует ожидать обогащения границ титаном, а в других сталях – хромом. Одновременно выравнивается концентрация углерода в объемах зерен. При последующем замедленном охлаждении в интервале температур сенсибилизации ( $600\ldots 900^{\circ}\text{C}$ ), или так называемом провоцирующем повторном нагреве до этой температуры, в процессе многоходовой сварки, эксплуатации или термообработки растворимость углерода в аустените резко снижается (см. рис. 10.17), что увеличивает его концентрацию на границах. Это при-

водит к образованию карбидов хрома, титана, ниobia и обеднению хромом прилегающих к границам периферии зерен. Обедненные хромом участки твердого раствора и карбиды являются объектом коррозии, они занимают узкую зону в ЗТВ, где локализуется межкристаллитная коррозия, получившая название «ножевой».

Аустенитизация сварных соединений приводит к растворению карбидов, выравниванию состава стали и восстановлению, хотя и неполному, коррозионной стойкости из-за остатков сегрегатов на участках оплавления границ зерен. Уровень стойкости против межкристаллитной коррозии оценивают по ГОСТ 6032-89 методами АМ, АМУ, В, ВУ, ДУ, Б. По методу АМ образцы со швом выдерживают в кипящем водном растворе с  $\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  15…24 ч, после чего изгибают на  $90^{\circ}$ . Наличие трещин служит браковочным признаком. Другие методы отличаются по составу травителя и длительности его действия.

Коррозионное растрескивание под напряжением является следствием циклического механоэлектрохимического эффекта в агрессивных средах. В местах контакта среды с металлом ЗТВ, имеющим отмеченную выше неоднородность, и на участках концентрации напряжений в сварных соединениях (рис. 10.19) образуются микротрещины в результате функционирования микрокоррозионной пары: вершина трещины (анод) – остальная поверхность под пассивирующей оксидной пленкой (катод). Накапливающиеся на аноде продукты коррозии закупоривают трещину и расклинивают ее.

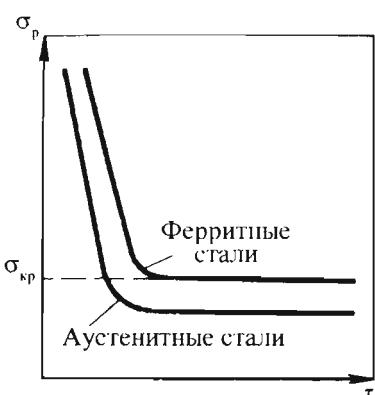
Связь между разрушающим напряжением  $\sigma_p$  и временем до разрушения для коррозионно-стойких сталей описывается зависимостью, приведенной на рис. 10.19, б. Напряжение  $\sigma_{kp}$  является пределом длительной коррозионной стойкости материалов.

Сварные соединения аустенитных сталей могут быть подвержены этому виду межкристаллитной коррозии в водных растворах хлористых солей, растворах щелочей, некоторых азотно-кислых солей и др., а также в паровой фазе.

В наибольшей степени склонны к растрескиванию сварные соединения аустенитных хромоникелевых сталей типов 18-10, 17-13-2, а также хромоникельмарганцевая сталь 10Х14Г14Н4Т, для которых характерно низкое отношение  $\sigma_{kp}/\sigma_b$  (0,25…0,4). Напротив, ферритные и аустенитно-ферритные коррозионно-стойкие стали и их сварные соединения проявляют высокую коррозионную стойкость (см.



а)



б)

Рис. 10.19. Микроструктура участка ЗТВ с коррозионным растрескиванием стали 08Х18Н10Т, увеличение 50<sup>×</sup> (а);

$\sigma_{cr} = f(T)$  – зависимость разрушающих напряжений от времени испытания при коррозионном растрескивании (б)

рис. 10.19). С ростом содержания никеля в аустенитных сталях  $\sigma_{cr}$  повышается. Испытания металла соединений на коррозионное растрескивание состоят в соответствии с ГОСТ 26924–84 в выдержке образцов под напряжением в коррозионной среде и определении  $\sigma_{cr}$ , приводящего к разрушению за определенное время.

Коррозионно-стойкие стали, отличающиеся повышенной гомогенностью, находят применение и при криогенных температурах, также создающих опасность хрупких разрушений. К числу основных требований, предъявляемых к сварным соединениям аустенитных сталей криогенного назначения, относят определенный комплекс механических свойств, а именно: сочетание высокой исходной прочности (при 20 °C), пластичности, вязкости при температурах до -269 °C и малой чувствительности к концентрации напряжений. При оценке механических свойств важно установить соотношение между характеристиками, используемыми для расчета конструкций, и склонностью материала к концентраторам напряжений или хрупкому разрушению, оцениваемому ударной вязкостью по ГОСТ 9454–78 на трех видах образцов: с надрезами радиусом 1,0 мм (KCU), 0,25 мм (KCV) и с трещиной (KCT).

На рис. 10.20 приведены данные, подчеркивающие преимущества аустенитных сталей в соотношении предела текучести при 20 °C и ударной вязкости образцов с трещиной (KCT) при -253 °C среди четырех основных классов коррозионно-стойких сталей и сплавов в криогенной технике: аустенитных сталей ( $\sigma_t$  до 500...550 МПа), сплавов на железной и никелевой основе с  $\sigma_t$  до 700 МПа, в том числе дисперсионно-твердеющих, а также сталей аустенитно-мартенситного и марленситного классов ( $\sigma_t$  до 1150...1200 МПа).

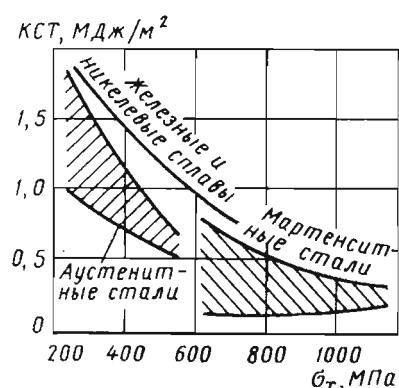


Рис. 10.20. Соотношение между значениями КСТ при -253 °C с пределом текучести при 20 °C для основных классов коррозионно-стойких сталей и сплавов, применяемых в криогенной технике

### 10.3.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ

#### 10.3.4.1. ВЫБОР СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ

При выборе способа сварки плавлением austenитных сталей необходимо обеспечить их свариваемость, т.е. предотвратить трещины различных типов в металле шва и ЗТВ как при сварке, так и при эксплуатации сварных соединений. При этом главное внимание обращают на технологическую прочность при сварке, так как ее уровень по закону технологического наследования определяется в существенной мере все другие структурочувствительные свойства соединений (жаропрочность, коррозионную стойкость и др.).

При выборе способа сварки следует стремиться к минимизации погонной энергии, чтобы уменьшить температуру перегрева и особенно – время нагрева. Этого достигают применением лазерной, электронно-лучевой сварки, дуговой ниточными валиками при много-проходной сварке, а также принудительным охлаждением различными способами. Наибольшие возможности в этом плане имеет контактная сварка. Однако при сварке толстолистовых конструкций типа сосудов ее применение ограничено.

При выборе режимов сварки плавлением главная задача – исключить появление ГТ в условиях малой погонной энергии. Однако сварка с большими скоростями недопустима, так как для сталей любого класса она приводит к образованию неблагоприятного встречного срастания в центре шва двух фронтов кристаллизации, образующего зону «слабины» (рис. 10.21). При однопроходной сварке с малыми скоростями следует предотвращать возникновение осевых кристаллитов, стыкающихся с двумя фронтами кристаллитов 1 под большим углом  $\theta^{\circ}/2$ . Значительная разориентировка между осевыми и боковыми кристаллитами увеличивает ликвацию по границам, плотность ростовых дислокаций и вызывает ГТ. Наиболее благоприятны схемы кристаллизации с изгибом кристаллитов (2, 3), при котором их угол срастания в центре шва близок к нулю, и многослойная сварка с полным охлаждением шва при выполнении последующего.

Совместное влияние силы тока и скорости сварки на образование ГТ представлено схемой на рис. 10.22. Наиболее эффективно регулирование скоростью сварки, которая может быть уменьшена до 6 м/ч при сварке сталей, весьма склонных к образованию ГТ.

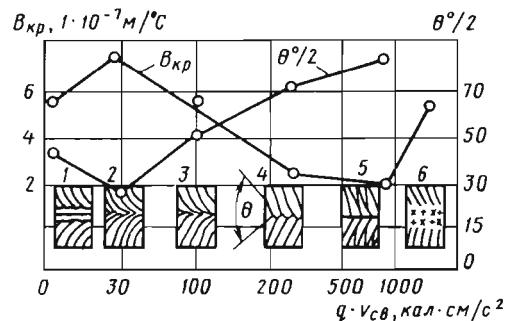


Рис. 10.21. Влияние режима однопроходной сварки на схему кристаллизации швов, угол срастания кристаллитов  $\theta^{\circ}/2$  в центре шва и  $B_{kp}$  – критический темп сопротивляемости образованию ГТ в ТИХ:  
1 – 6 – схемы кристаллизации для различных режимов ( $qV_{cb}$ )



Рис. 10.22. Влияние силы тока и скорости сварки на образование ГТ в металле шва:  
1 – Св-08Х18Н10Г6Т; 2 – то же с электромагнитным перемешиванием; 3 – то же при вводе идентичной присадки в ванну

Снижение силы тока менее результативно. Обобщенным критерием режима является произведение  $qV_{cb}$  – энерговложение, приходящееся на секундную длину шва (см. рис. 10.21). Чем больше  $qV$ , тем ниже стойкость против образования ГТ в металле шва и ЗТВ. Его значимость для дуговой и лучевой сварки обусловлена тем, что с увеличением  $qV_{cb}$  растут длина ванны, угол встречи кристаллитов в центре шва, а также темп растяжения металла ЗТВ в ТИХ. При однопроходной сварке тонких листов без присадки косвенным критерием угла встречи кристаллитов может служить радиус кривизны изотермы сварочной ванны, определяемый по форме чешуек на свободной поверхности шва. Чем больше радиус кривизны, тем выше сопротивляемость ГТ. При уточненном выборе режимов необходима

количественная оценка сопротивляемости ГТ, выполняемая по ГОСТ 26389–84 путем определения  $B_{kp}$  – критического темпа растяжения в ТИХ<sub>1</sub>.

Повышение сопротивляемости образованию ГТ и механических свойств может быть достигнуто также внешними технологическими воздействиями:

- перемешиванием сварочной ванны путем механического или электромагнитного воздействия (магнитная индукция 0,05...0,07 Тл, частота 5...6 Гц);
- введением в ванну внешних и внутренних стоков теплоты подачей струи воды (при сварке в защитном газе) и твердого присадочного металла для ускорения кристаллизации ванны.

Рекомендованы следующие режимы подачи присадки:

- диаметр проволоки 1,4...3 мм;
- место ввода  $\geq 1/3$  длины ванны за осью дуги;
- количество подаваемой присадки до 70 % от расхода электрода;
- нагрев присадки до 0,9 от температуры солидуса;
- подача присадки в ванну под напряжением сжатия 5...15 МПа. Ввод присадки

рекомендован при дуговой, электрошлаковой и лучевой сварке.

#### 10.3.4.2. ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкции из жаропрочных сталей, работающие при температурах до 600 °C, сваривают сварочными материалами, обеспечивающими в швах обязательное присутствие 2...4 % ферритной фазы (для предотвращения ГТ в металле шва). Типы сварочных материалов для сварки гомогенных жаропрочных сталей аустенитно-ферритными сварочными материалами с регламентированным количеством δ-Fe приведены в табл. 10.36 и 10.37.

Наиболее просто заданное количество δ-Fe обеспечивают при сварке штучными электродами. При сварке в защитных газах и под флюсом необходимо учитывать долю участия основного металла в металле шва и варьировать марки присадочной проволоки при выполнении корневых и облицовочных швов, существенно отличающихся по доле участия основного металла. Чтобы исключить охрупчивание таких швов в результате сигматизации, не следует: допускать >4 % δ-Fe, отдавать предпочтение электродам с минимально допустимым содержанием элементов-ферритизаторов, а также подвергать швы аустенитизации.

### 10.36. Электроды, применяемые для сварки аустенитных жаропрочных сталей, и свойства наплавленного металла

Марка стали	Марка электрода	Тип наплавленного металла	Температура испытания, °C	Длительная прочность, МПа		Структура наплавленного металла
				10 ч	10 <sup>5</sup> ч	
12X18H9	ЦТ-26	10X16H9M2	550	220	160	2...4 % δ-феррита
12X18H12T			600	170	140	
08X16H9M2			650	110	80	
12X16H13M2Б	ЦТ-7 КТИ-5	10X18H11M2Ф	600	–	160	3...5 % δ-феррита
			650	130	90	
35X19H10M2Б	ЦТ-5	12X20H10МВФБ	600	220	220	
12X16H14B2БР	ЦТ-16	10X18H10B2Б	600	170	130	
12X16H2B2Б	ЦТ-25	12X16H9B4Б	650	160	130	2...4 % карбидов (интерметаллидов)
10X16H16B2БР	ЦТ-23	12X15H146B2Б	660	130	100	
12X15H25M6A	ЦТ-10	12X15H25M6	650	150	120	
12X14H20B2БР	АЖ-13-18	12X14H18B2Б	650	180	130	
12X15H35B3T2	КТИ-7	30X13H35B3Б2	650	220	180	
20X25H20C	ОЗЛ-9А	40X25H6Г7	900	110	–	
25X20H35C	ЦТ-28	06X15H60M15B6	950	140	–	

### 10.37. Сварочные материалы для сварки жаропрочных сталей

Марка		
стали	проводки	флюса
08Х18Н10; 08Х18Н12Б	08Х18Н9Б	АН-18; 48-ОФ-6М
09Х16Н9М2	08Х16Н8М2	АН-26; 48-ОФ-6; ФЦ-17
10Х17Н13В2М	08Х15Н9В4Б	АН-18
12Х18Н12Т; 20Х23Н18	10Х16Н25АМ6	АН-18; 48-ОФ-6М
08Х15Н35В4Т	06Х15Н35Г7В7М3Т	48-ОФ-6М; АНФ-23
10Х15Н24В5Т2Р1	06Х15Н24В5Т2Р1	АНФ-23
20Х23Н18	08Х25Н20С2Р1	
20Х23Н35С	07Х25Н50М9К9Б2Г3; ЭП 883	

Для конструкций из гетерогенных жаропрочных сталей, длительно работающих при температурах 700...750 °С, применяют структурно более стабильные сварочные материалы аустенитно-карбидного, аустенитно-боридного и аустенитного классов с учетом их склонности к подсолидусным трещинам. Повышенную стойкость швов такого состава против образования ГТ обеспечивают повышением их чистоты по вредным примесям при специальной технологии выплавки.

Для однофазных аустенитных сварочных материалов, применяемых для сварки сталей, не содержащих ниобий, стойкость против ГТ в шве получают путем легирования молибденом и марганцем, а также рафинирующими переплавами и добавками редкоземельных элементов. Для сохранения легирующих элементов в швах используют инертные защитные газы и безокислительные галоидные флюсы ФЦ-17, ФЦ-18, АНФ-5, 48-ОФ-6М и др., а также ввод сварочной проволоки в ванну в твердом состоянии, минуя капельный перенос в столбе дуги.

При выборе электродов для сварки конструкций из коррозионно-стойких сталей необходимо получить бездефектное соединение, в котором металл шва и ЗТВ удовлетворяет по антикоррозионным свойствам требованиям, предъявляемым к нему условиями эксплуатации конструкции. Соотношение химической прочности ряда композиций представлено на рис. 10.23. Вследствие повышенной склонности аустенитных швов к образованию ГТ, пониженнной их коррозионной стойкости, трудности легирования легкоокисляющимися элементами (алюминием, титаном и др.) часто ориентируются на получение швов, по химическому

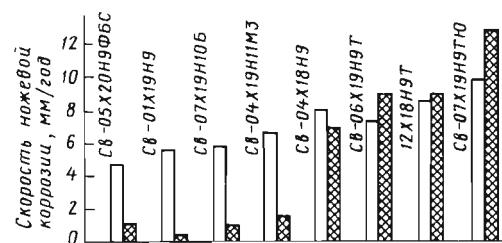


Рис. 10.23. Сравнение скорости ножевой коррозии в кипящей 65%-ной азотной кислоте (столбик без штриховки) и коррозии шва для сварных соединений ряда хромоникелевых сталей и сварочных материалов (штриховка)

составу отличающихся от свариваемого металла. В табл. 10.38 приведены рекомендации по выбору материалов для сварки различными способами коррозионно-стойких сталей.

При сварке сталей с большим запасом аустенитности, особенно толщиной >14...16 мм, высокая трещиноустойчивость достигается при: легировании швов дополнительно марганцем, молибденом, азотом; ограничении содержания серы (до 0,010 %), фосфора (до 0,01 %), кремния (до 0,2...0,3 %); исключении из них титана, ниобия, алюминия, а в ряде случаев при использовании композиционного по составу и структуре многослойного металла шва. В последнем случае 70...80 % сечения шва («несущие» слои) выполняются с применением сварочных материалов, отличных по химическому составу от свариваемой стали и обеспечивающих аустенитно-ферритную структуру. Остальная часть шва, обращенная в сторону агрессивной среды, выполняется материалами, близкими по химическому составу свариваемой стали.

**10.38. Рекомендуемые сварочные материалы для дуговой сварки коррозионно-стойких сталей**

Марка стали	Требования к сварным соединениям	Сварка			
		электродуговая	аргонодуговая	под флюсом	в CO <sub>2</sub>
		Электрод (ГОСТ 10052-75)	Присадочная проволока (ГОСТ 2246-70)	Флюс	Проволока
08Х18Н10Т	Стойкость против общей коррозии	Э-07Х20Н9 (ОЗЛ-8)	Св-06Х19Н9Т	AH-26, AH-45	Св-06Х19Н9, Св-08Х20Н9Г7Т
07Х18Н10Т			Св-08Х20Н9Г7Т		Св-08Х20Н9Г7Т
12Х18Н10Т, 06Х18Н11	Стойкость против общей и межкристаллитной коррозии	Э-08Х20Н9Г2Б (ОЗЛ-7, ПЛ-11), Э-08Х19Н10Г2Б (ЦТ-15), Э-02Х19Н9Б (АНВ-13)	Св-08Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС	AH-18	Св-08Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС
03Х18Н11		Э-02Х19Н9Б (АНВ-13)	Св-01Х19Н9		Не рекомендуется
10Х14Г14М4Т, 10Х14АГ15, 07Х21Г7АН5	Стойкость против общей коррозии	Э-02Х21Н10Г2 (ОЗЛ-22), Э-07Х20Н9 (ОЗЛ-8), Э-04Х20Н9 (ОЗЛ-14А)	Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т	AH-26, AH-45	Св-08Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС
08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т	Стойкость против общей и межкристаллитной коррозии	Э-09Х19Н10Г2М2Б (НЖ-13), Э-07Х19Н11М3Г2Ф (ЭА-400/10У), Э-02Х19Н18Г5АМ4 (АНВ-17), Э-02Х19Н18Г5АМ3 (АНВ-17)	Св-06Х19Н10М3Т, Св-08Х19Н11М3Б, Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ЭП 690)	AH-26, AH-18, AH-45	Св-06Х19Н10М3Т, Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-01Х19Н18Г10АМ4
08Х17Н15М3Т, 03Х16Н15М3, 03Х21Н21М4Г6		Э-02Х20Н14Г2М2 (ОЗЛ-20), 02Х25Н24М3АГ3 (АНВ-42), Э-02Х19Н18Г5АМ3 (АНВ-17)	Св-01Х19Н18Г10АМ4		
02Х8Н22С6		02Х17Н14С5 (ОЗЛ-24), 02Х12Н11С6 (АНВ-47)	Св-01Х12Н11С6Ц (ЭК-76)		

### 10.3.4.3. ВЫБОР ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Сварные узлы из аустенитных сталей, эксплуатирующиеся без воздействия агрессивных сред до 500 °C, могут не подвергаться термической обработке. При работе в коррозионной среде проводят стабилизирующий отжиг при температуре 850...950 °C. Остаточные напряжения, являющиеся основной причиной коррозионного растрескивания, при нагреве до этих температур практически полностью снижаются. Для жаропрочных термоупрочняемых материалов проводят двухступенчатый отжиг: 900 °C в течение 10 ч +750 °C в продолжение 30 ч.

При работе в условиях ползучести >500 °C стабилизирующий отжиг недостаточен, так как не устраняет в ЗТВ опасность развития локальных разрушений и коррозионного растрескивания в некоторых средах. В этих случаях проводят аустенитизацию (закалку) при температуре 1100...1150 °C, при которой растворяются все упрочняющие фазы в матрице, а при последующей стабилизации или отпуске выделяются вторичные фазы в виде, требуемом для получения оптимальных свойств в ЗТВ и сварного соединения в целом. Наиболее высокая вязкость и коррозионная стойкость достигаются двойной аустенитизацией (при 1150...1200 и 1000 °C), при которой обеспечивается коагулирование карбидов на границах зерен. При сварке с малой погонной энергией (электронно-лучевая и др.) сверхнизкоуглеродистых жаропрочных сталей, легированных молибденом (X16H9M2 и др.), послесварочная термообработка не обязательна.

### 10.3.5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Для жаропрочных гомогенных сталей в условиях, исключающих ползучесть (до 500 °C), длительная прочность швов ниже основного металла лишь при циклическом нагружении.

Для гетерогенных, термически упрочняемых сталей при сварке имеет место большая степень повреждаемости ЗТВ. Длительная прочность снижается по отношению к основному металлу на 10...15 %; более значительно падает пластичность, что увеличивает вероятность локальных разрушений в процессе продолжительной эксплуатации при высоких температурах. Эффективной мерой их предупреждения служит периодическая проводимая аусте-

нитизация сварных стыков (например, паропроводов), а также применение сталей повышенной чистоты в результате вакуумно-дугового переплава. Повышению жаропрочности ЗТВ также способствуют аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадкой и лучевые способы сварки, обеспечивающие минимум теплового воздействия и предотвращающие рост зерна. Для коррозионно-стойких сталей главным фактором эксплуатационных свойств сварных соединений является скорость ножевой коррозии, сопротивление коррозионному растрескиванию и ЛРОЗ.

На рис. 10.23 приведено сравнение скоростей ножевой коррозии шва и ОШЗ.

При сварке проволоками Св-06Х19Н9Т, Св-07Х19Н10Б скорость коррозии наплавленного металла в кипящей концентрированной азотной кислоте выше, чем ножевая коррозия ОШЗ. При сварке другими проволоками, не содержащими титан (см. рис. 10.23), более коррозионно-стойк metal шва. Для таких соединений наиболее опасным видом разрушения является ножевая коррозия ОШЗ, скорость которой достигает 4...6 мм/год. Из этого рисунка следует, что скорость ножевой коррозии весьма значительна и слабо зависит от сварных материалов.

## 10.4. ХРОМИСТЫЕ СТАЛИ

Хромистые стали не являются дефицитными в отношении легирования материалами и находят широкое применение для изготовления различного рода техники, работающей при высоких давлениях и температуре в условиях воздействия агрессивных сред.

Легирование хромом не только обеспечивает коррозионную стойкость сталей в окислительных средах, но и определяет их структуру, механические свойства, жаропрочность, технологические свойства. Образуя с железом непрерывный ряд твердых растворов при концентрациях до 12 %, хром затем способствует замыканию γ-области, что является основной причиной формирования в хромистых сталях различной структуры и многообразия их свойств.

В соответствии с диаграммой Fe – Cr (рис. 10.24) γ-область ограничена справа двумя линиями, замыкающими гетерогенный участок  $\alpha(\delta) + \gamma$ .

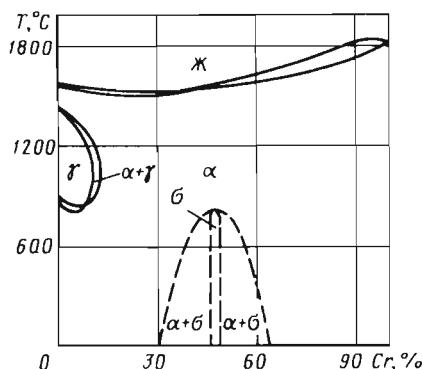


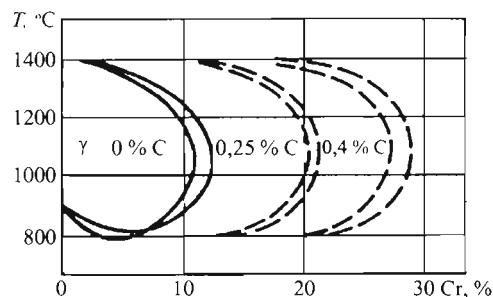
Рис. 10.24. Диаграмма состояния сплавов Fe - Cr

Хром сильно влияет на положение критических точек, отмечающих  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Вначале увеличение содержания хрома приводит к понижению точки  $A_3$ . При концентрациях до 8 % хром относится к элементам, способствующим устойчивости аустенита и расширению его температурной области. Большие концентрации хрома повышают точку  $A_3$ . У сплавов с  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением легирование хромом значительно снижает также критическую скорость охлаждения. В результате этого при низком содержании углерода у хромистых сталей возможно формирование однофазной мартенситной структуры. Наглядным примером этого является формирование мартенсита в структуре стали X9M при охлаждении от 800 °C даже с весьма низкой (~1 °C/c) скоростью.

В безуглеродистых сплавах  $\gamma$ -область замыкается при 11...12 % Cr. При более высоком содержании хрома аустенит встречается только в сплавах с высоким содержанием углерода (рис. 10.25). При содержании ~12 % Cr у низкоуглеродистых сталей после охлаждения наряду с мартенситом в структуре обнаруживается некоторое количество ферритной составляющей.

При >12 % Cr все безуглеродистые сплавы являются ферритными.

Хром эффективно повышает коррозионную стойкость сталей при концентрациях >12 %. Поэтому менее легированные хромистые стали применяют в основном как конструкционный материал для высоконагруженного энергетического и нефтехимического оборудования. Из сталей с  $\geq 13$  % Cr изготавливают оборудование для работы в агрессивных жидких и газовых средах (морской воде, кислотах,

Рис. 10.25. Влияние углерода на замыкание  $\gamma$ -области у сплавов Fe - Cr

продуктах сгорания топлива и т.п.). Обладая высокой коррозионной стойкостью, высоколегированные хромистые стали ферритного класса не пригодны для оборудования, работающего в условиях высокотемпературной ползучести. Это связано с низкой жаропрочностью, обусловленной ферритной структурой высоких хромистых сталей.

Совместное легирование хромом и никелем способствует получению в сталях однородных и гетерофазных структур, формированию наряду с мартенситом и ферритом также аустенитной составляющей, количество которой зависит от концентрации указанных выше элементов. Структура хромистых сталей, дополнительно легированных никелем, может быть оценена с помощью диаграммы Шеффлера (см. рис. 10.10). Эта диаграмма позволяет также рассчитать влияние на структуру других легирующих элементов.

В соответствии с ГОСТ 5632-72 высоколегированные стали подразделяются на группы: коррозионно-, жаростойкие и жаропрочные. В зависимости от структуры хромистые стали могут быть отнесены к различным классам: мартенситному, мартенситно-ферритному, ферритному, аустенитно-мартенситному и аустенитно-ферритному.

#### 10.4.1. МАРТЕНСИТНЫЕ СТАЛИ

Хромистые мартенситные стали (табл. 10.39) имеют в основном повышенное содержание углерода, некоторые из них дополнительно легированы никелем, молибденом и другими элементами. Углерод и никель расширяют  $\gamma$ -область и способствуют полному  $\gamma \rightarrow \alpha(m)$ -превращению в процессе охлаждения. Ферритообразующие элементы (молибден,

## 10.39. Химический состав хромистых мартенситных сталей

Марка стали	Массовая доля, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	прочих элементов
15Х5	$\leq 0,15$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$4,5\dots 6,0$	$\leq 0,6$	$0,45\dots 0,60$	$\text{--}$	$\leq 0,025$	$\leq 0,030$	Не регламентируются
15Х5М										
15Х5ВФ		$0,3\dots 0,6$						$0,4\dots 0,6$		
12Х8	$\leq 0,12$	$0,17\dots 0,37$	$0,3\dots 0,6$	$7,5\dots 9,0$	$\leq 0,40$	$\text{--}$	$\text{--}$	$\leq 0,030$	$\leq 0,035$	$1,25\dots 1,75 \text{ W}$
20Х8ВЛ	$0,15\dots 0,25$	$0,30\dots 0,60$	$0,30\dots 0,50$					$\leq 0,035$	$0,040$	
12Х8ВФ	$0,08\dots 0,15$	$\leq 0,6$	$\leq 0,5$					$0,3\dots 0,5$	$\leq 0,025$	$0,6\dots 1,0 \text{ W}$
10Х9МФБ	$0,08\dots 0,12$	$\leq 0,5$	$0,3\dots 0,6$	$8,6\dots 10,0$	$\leq 0,7$	$0,6\dots 0,8$	$0,15\dots 0,25$	$\leq 0,015$	$\leq 0,030$	Не регламентируются
12Х11В2МФ	$0,10\dots 0,15$		$0,50\dots 0,80$	$10,0\dots 12,0$	$\leq 0,6$	$0,6\dots 0,9$	$0,15\dots 0,30$	$\leq 0,025$		
15Х11МФ	$0,12\dots 0,19$		$\leq 0,7$	$10,0\dots 11,5$	$\text{--}$	$0,6\dots 0,8$	$0,25\dots 0,40$		$\leq 0,030$	Не регламентируются
18Х11МНФБ	$0,15\dots 0,21$	$\leq 0,6$	$0,6\dots 1,0$			$0,5\dots 1,0$	$0,8\dots 1,1$	$0,20\dots 0,40$		
13Х11Н2В2МФ	$0,10\dots 0,16$		$\leq 0,60$	$10,0\dots 12,0$	$1,5\dots 1,8$	$0,35\dots 0,50$	$0,18\dots 0,30$			
10Х12НДЛ	$\leq 0,10$	$0,17\dots 0,40$	$0,20\dots 0,60$	$12,0\dots 13,0$	$1,0\dots 1,5$	$\text{--}$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	$0,80\dots 1,10 \text{ Cu}$	Не регламентируются
06Х12Н3Д	$\leq 0,06$	$\leq 0,30$	$\leq 0,60$	$12,0\dots 13,5$	$2,8\dots 3,2$					
20Х13	$0,16\dots 0,25$	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	$12,0\dots 14,0$	$\text{--}$					

вольфрам, ванадий, ниобий) вводят для повышения жаропрочности сталей. Если обычные 11...12%-ные хромистые стали обладают высокой прочностью до 500 °C, то стали, дополнительно легированные карбидообразующими элементами, обладают высокими прочностными характеристиками до 650 °C, что позволяет их использовать для изготовления современного энергетического оборудования (табл. 10.40). Молибден и вольфрам, кроме того, устраняют развитие хрупкости в процессе длительной эксплуатации хромистых сталей при высоких температурах.

Повышенная склонность мартенситных сталей к хрупкому разрушению в закаленном состоянии усложняет технологию их сварки. Содержание углерода в мартенситных сталях, как правило, >0,10 %, поэтому в сварных соединениях возможно образование холодных трещин (ХТ) из-за высокой тетрагональности образующегося в процессе охлаждения мартенсита. При снижении содержания углерода

вязкость мартенсита повышается, однако возникает опасность образования структурно-свободного феррита, который, в свою очередь, является причиной высокой хрупкости, не устранимой к тому же термическим отпуском. Поэтому в сварных соединениях мартенситных сталей трещины могут наблюдаться в процессе непрерывного охлаждения, а также после охлаждения до нормальной температуры вследствие замедленного разрушения.

Для высокохромистых сталей температура начала мартенситного превращения ( $T_{m,n}$ ) ≤360 °C, а окончания ( $T_{m,k}$ ) 240 °C. С увеличением содержания углерода точки  $T_{m,n}$  и  $T_{m,k}$  еще более понижаются, что приводит к возрастанию твердости мартенсита и его хрупкости. Учитывая это, а также необходимость обеспечения высокой пластичности, ударной вязкости и стойкости против хрупкого разрушения, содержание углерода в хромистых мартенситных сталях ограничивают до 0,20 %.

#### 10.40. Механические свойства хромистых мартенситных сталей, не менее

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Примеры использования
15Х5	392	216	24	50	98	Сварные сосуды и аппараты с давлением до 16 МПа при температуре стенки ≥−70 °C
15Х5М			22		118	
15Х5ВФ			—	—	—	
12Х8			50	170	—	
12Х8ВФ		167	16	30	39	
20Х8ВЛ	589	392	20	70	80	
10Х9МФБ	600	400	15	55	60	Поверхность нагрева котлов, коллектора, трубопроводы
15Х11МФ	690	490	50	55		
18Х11МНФБ	740	590	55	50		
13Х11Н2В2МФ	880	735	50	90		
12Х11В2МФ	850	700	14	30	50	Диафрагмы паровых турбин, детали гидротурбин
10Х12НДЛ	700	500	14	30	Рабочие колеса гидротурбин, корпуса насосов АЭС	
06Х12НЗД			16	55		80
20Х13	650	440	16	55	80	Лопатки паровых турбин, детали насосов

Для предотвращения образования ХТ мартенситные стали сваривают при температуре воздуха  $\geq 0$  °C и применяют предварительный и сопутствующий подогрев до 200...450 °C. Температура подогрева назначается в зависимости от склонности стали к закалке. В то же время данная температура не должна быть чрезмерно высокой, так как это может привести к отпускной хрупкости вследствие снижения скорости охлаждения металла в ОШЗ в интервале температур карбидообразования. Высокий подогрев, как и сварка с большой погонной энергией, приводит к перегреву околосшовного металла, росту зерна, сегрегациям примесей на границах зерен, способствующих охрупчиванию сварных соединений. Лучшие свойства достигаются при подогреве в интервале  $T_{\text{м.н.}} \dots T_{\text{м.к.}}$  с подстуживанием после сварки до  $T_{\text{м.к.}}$ , но  $\geq 100$  °C.

До термической обработки рекомендуется не подвергать сварные соединения какими-либо нагрузкам, кантовать и транспортировать (табл. 10.41). В частности, термообработку сварных стыков труб при сооружении трубопроводов следует выполнять до холодного

натяга трубопровода, т.е. до сборки и сварки замыкающего шва.

Многие из отмеченных выше недостатков в свариваемости мартенситных сталей не присущи малоуглеродистым хромистым сталим, дополнительно легированным никелем. Мартенсит, образующийся при закалке хромоникелевой стали 06Х12Н3Д с низким содержанием углерода, отличается высокими пластичностью и вязкостью, не приводит к ХТ в сварных соединениях. Высокие пластические свойства малоуглеродистого мартенсита способствуют получению надежных сварных соединений, прежде всего при сварке без подогрева. Однако чувствительность сварных швов к водородной хрупкости вызывает необходимость сваривать такие стали с предварительным подогревом до  $\sim 100$  °C. Улучшению свариваемости таких сталей способствует также остаточный аустенит. Однако для достижения максимальных значений прочности, пластичности и ударной вязкости рекомендуется охладить сварные соединения хромоникелевых мартенситных сталей до нормальной температуры для полного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, а затем подвергнуть термическому отпуску для снятия остаточных напряжений.

#### 10.41. Рекомендации по тепловому режиму сварки хромистых мартенситных сталей

Марка стали	Температура подогрева, °C	Продолжительность хранения до термической обработки, ч	Термическая обработка
15Х5, 15Х5МУ, 15Х5ВФ	200	Не допускается	Отпуск при 700...750 °C
12Х8, 12Х8ВФ, 20Х8ВЛ, 10Х9МФБ		Не регламентируются	Отпуск при 710...760 °C
12Х11В2МФ	250...300	72	Отпуск при 700...720 °C (предварительный) и 735...365 °C (окончательный)
15Х11МФ, 18Х11МНФБ, 13Х11Н2В2МФ	300	Не допускается	Отпуск при 700...720 °C (без охлаждения ниже температуры подогрева). При толщине >30 мм перед термообработкой рекомендуется подстуживание до 100 °C
10Х12НДЛ	$\geq 100$		Отпуск при 650 °C (с предварительным подстуживанием)
06Х12Н3Д	$\geq 200$	Допускается	Отпуск при 610...630 °C (предварительный) и 625...650 °C (окончательный)
20Х13	$\geq 300$	2	Отпуск при 700...720 °C

Среди методов, применяемых для сварки изделий из мартенситных сталей, наиболее распространена ручная дуговая сварка (РДС) покрытыми электродами, обеспечивающими получение сварных швов, по химическому

составу близких к основному металлу (табл. 10.42). Находят также применение способы автоматической дуговой сварки (АДС) под флюсом, аргонодуговой (АрДС) и электрошлаковой сварки (ЭШС).

#### 10.42. Способы сварки, сварочные материалы и механические свойства сварных соединений хромистых мартенситных сталей

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений, не менее		
		$\sigma_b$ , МПа	KСU, Дж/см <sup>2</sup>	угол загиба, °
15Х5, 15Х5М, 15Х5МУ, 15Х5ВФ, 20Х5МЛ, 20Х5ВЛ	РДС: электроды Э-10Х5МФ, ЦЛ-17. АДС: проводка Св-10Х5М, флюсы АН-22, АН-43. АрДС: проводка Св-06Х8Г2СМФТЮЧ, Св-10Х5М, аргон	470	50	100
12Х8, 12Х8ВФ, Х9М, 10Х9МФБ, 20Х8ВЛ, 10Х9МФБ	РДС: электроды ЦЛ-57 АрДС: проводка Св-06Х8Г2СМФТЮЧ, argon			
12Х11В2МФ	РДС: электроды Э-14Х11НВМФ, ЦЛ-32	735	40	Не регла- ментируется
15Х11МФ, 18Х11МНФБ, 13Х11Н2В2МФ	РДС: электроды Э-Х11НМФ КТЧ-9, Э-12Х11НВМФ КТЧ-10 Э-11Х15Н25М6АГ2, ЭА-395/9	735	50	
	588	40		
10Х12НДЛ	РДС: электроды Э-06Х13Н, ЦЛ-41	580	40	
	ЭШС: проводка Св-12Х13, флюс АН-8	637		
06Х12Н3Д	РДС: электроды ЦЛ-51	600		
	АДС: проводка Св-01Х12Н2-ВИ, флюс ФЦ-19	637		
	АрДС: проводка Св-01Х12Н2-ВИ, argon			
	ЭШС: проводка Св-01Х12Н2-ВИ, флюс АН-45	590		
20Х13	РДС: – электроды Э-10Х25Н13Г2, ЗиО-8	540	50	
	– электроды ЦЛ-25, ЦЛ-51	637		
	АДС: проводка Св-07Х25Н13, флюс АН-26	540		
			Не регла- ментируется	

#### 10.4.2. МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫЕ СТАЛИ

К классу мартенситно-ферритных относят стали с частичным  $\gamma \rightarrow \alpha(m)$ -превращением. Термокинетическая диаграмма у этих сталей состоит из двух областей превращения. При температурах  $>600^{\circ}\text{C}$  при низкой скорости охлаждения возможно образование ферритной составляющей структуры. При большой скорости охлаждения ( $<400^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит. Количество образовавшегося мартенсита зависит от содержания углерода и скорости охлаждения.

Содержание хрома в мартенситно-ферритных сталях 13...14 %, что оптимально по коррозионной стойкости. Такой уровень легирования хромом обеспечивает пассивацию поверхности в агрессивных средах, связанных с нефтехимическим производством; в воде высоких параметров, в том числе с борным регулированием. Дальнейшее повышение со-

держания хрома практически без увеличения коррозионной стойкости сталей в указанных средах способствует формированию в их структуре значительного количества ферритной составляющей. Стали с большим содержанием  $\delta$ -феррита в структуре отличаются повышенной склонностью к хрупкому разрушению, их сварка связана с риском образования ХТ.

Мартенситно-ферритные стали находят довольно широкое применение для изготовления нефтехимической аппаратуры и энергетического оборудования (табл. 10.43, 10.44).

По свариваемости мартенситно-ферритные стали являются неудобными материалами. В связи с неизбежной подкалкой при сварке сварные соединения мартенситно-ферритных сталей склонны к образованию трещин замедленного разрушения. Кроме того, при перегреве в ЗТВ часто наблюдают трещины хрупкого разрушения.

#### 10.43. Химический состав хромистых мартенситно-ферритных сталей

Марка стали	Массовая доля, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	прочих элементов
15Х12ВНМФ	0,12... 0,18	$\leq 0,4$	0,5... 0,9	11,0... 13,0	0,4... 0,8	0,5... 0,7	0,15... 0,30			0,7...1,1 W
12Х13	0,09... 0,15	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	12,0... 14,0	—	—	—	$\leq 0,025$	$\leq 0,030$	Не регламентируются
14Х17Н2	0,11... 0,17			16,0... 18,0	1,5... 2,5					
08Х14МФ	0,03... 0,12	0,20... 0,45	0,8... 1,2	12,0... 14,0	—	0,2... 0,4	0,15... 0,30			

#### 10.44. Механические свойства хромистых мартенситно-ферритных сталей, не менее

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KСU, Дж/см <sup>2</sup>	Примеры использования
15Х12ВНМФ	740	590	15	45	60	Детали паровых, газовых и гидравлических турбин и компрессоров
12Х13	590	410	20	60	100	
14Х17Н2	835	635	10	30	50	Детали внутренних устройств оборудования АЭС
08Х14МФ	450	300	22	—		Теплообменники тепловых и атомных электростанций, облицовки хранилищ

Ударная вязкость металла в ЗТВ сварных соединений 13%-ных хромистых сталей снижается до 10 Дж/см<sup>2</sup>. В случае низкого содержания  $\delta$ -феррита последующим термическим отпуском при 700 °C, способствующим распаду структур закалки и выделению карбидов, можно повысить ударную вязкость металла в ЗТВ до 50...100 Дж/см<sup>2</sup>. При способах сварки, способствующих значительному перегреву металла в ЗТВ с образованием структуры с большим содержанием  $\delta$ -феррита, термический отпуск мало влияет на ударную вязкость, в результате чего сварные соединения отличаются высокой хрупкостью и не годятся для нагруженных конструкций.

Эффективным способом снижения содержания ферритной составляющей в структуре хромистых сталей является легирование их углеродом и никелем.

Образование большого количества  $\delta$ -феррита в структуре околошовного металла характерно для 13...14%-ных хромистых сталей с <0,1 % С. В участках ОШЗ сварных соединений, нагреваемых до температур, близких к температуре солидуса, количество  $\delta$ -феррита в структуре может быть подавляющим. Ширина таких участков мало зависит от температуры подогрева при сварке, но возрастает с погонной энергией сварки.

Мартенситно-ферритные стали сваривают, как правило, с предварительным и сопутствующим подогревом (табл. 10.45).

Для низкоуглеродистой стали 08Х14МФ подогрев при сварке не применяют, так как легирование карбидообразующими элементами снижает эффективное содержание углерода.

Способы сварки и применяемые для мартенситно-ферритных сталей сварочные материалы приведены в табл. 10.46.

#### 10.45. Рекомендации по тепловому режиму сварки мартенситно-ферритных сталей

Марка стали	Температура подогрева, °C	Продолжительность хранения до термической обработки, ч	Термическая обработка
15Х12ВНМФ	300	Не допускается	Отпуск при 700...720 °C. При толщине >30 мм перед отпуском рекомендуется подстуживание до 100 °C
12Х13		2	Отпуск при 700...720 °C
14Х17Н2	150...250	Не ограничено	Отпуск при 620...640 °C
08Х14МФ	Без подогрева	Не регламентируется	Отпуск при 680...700 °C

#### 10.46. Способы сварки, сварочные материалы и механические свойства сварных соединений мартенситно-ферритных сталей

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений	
		$\sigma_b$ , МПа	KСU, Дж/см <sup>2</sup>
15Х12ВНМФ	РДС:		
	– электроды Э-12Х11НМФ КТИ-9	735	50
12Х13	– электроды Э-11Х15Н25М6АГ2 ЭА-395/9	588	40
	РДС:		
	– электроды Э-12Х13 ЛМЗ-1, Э-06Х13Н ЦЛ-41, ЦЛ-51	637	50
	– электроды Э-11Х15Н25М6АГ2 ЭА-395/9	588	40
	– электроды Э-10Х25Н13Г2 ЗиО-8, ЦЛ-25	540	50

Окончание табл. 10.46

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений	
		$\sigma_b$ , МПа	KСU, Дж/см <sup>2</sup>
14Х17Н2	РДС: электроды Э-10Х18Н2 АНВ-2. АДС: проводолка Св-08Х18Н2ГТ, Св-08Х14ГНТ, флюсы АН-26с, ОФ-6, АНВ-6. АрДС: проводолка Св-08Х18Н2ГТ, Св-08Х14ГНТ, аргон	755	50
08Х14МФ	РДС: электроды Э-10Х25Н13Г2, ЦЛ-25	540	
	АДС: проводолка Св-07Х25Н13, АН-26	540	
	АрДС: проводолка Св-04Х20Н5М6Б	490	
	Св-07Х25Н13, аргон	540	

#### 10.4.3. ФЕРРИТНЫЕ СТАЛИ

При содержании ~12 % Cr у безуглеродистых сплавов Fe – Cr критические точки  $A_1$  и  $A_3$  на диаграмме (см. рис. 10.24) сливаются. При дальнейшем увеличении содержания хрома сплавы не претерпевают превращений. Стали, структура которых соответствует этой области диаграммы Fe – Cr, относят к ферритным.

Хромистые ферритные стали (табл. 10.47 и 10.48) во многих агрессивных средах превосходят по коррозионной стойкости хромоникелевые аустенитные стали, не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением. При дополнительном легировании кремнием и алюминием хромистые стали могут быть использованы для оборудования, работающего в окислительных условиях при высоких температурах.

Широкое применение хромистых ферритных сталей с обычным содержанием углерода и азота сдерживается из-за чрезмерной хрупкости их сварных соединений. Высокая чувствительность к надрезу при нормальной температуре делает их непригодными для изготовления оборудования, работающего под давлением, при ударных и знакопеременных нагрузках. Такие ферритные стали используют для изготовления ненагруженных устройств и изделий.

Хорошая свариваемость хромистых ферритных сталей обеспечивается ограничением в их составе углерода и азота, образующих твердые растворы внедрения. Стали, содержащие ≤0,020 % C и N в сумме, отличаются высокой пластичностью и ударной вязкостью, не склонны к охрупчиванию при сварке. Производство таких сталей возможно в вакуумных печах или с внепечной обработкой (продувкой расплава аргоном или аргоно-кислородной смесью).

Стали, произведенные в открытых печах, вследствие относительно высокого содержания углерода и азота имеют низкую пластичность и ударную вязкость, что затрудняет проведение не только сварки, но и других технологических операций (гибки, вальцовки). Повышению пластичности сталей 08Х13, 08Х17Т и 15Х25Т способствует их прокатка при пониженных температурах (до 820...850 °C). В этом случае относительное удлинение проката увеличивается до  $A_5 = 25\%$ , а ударная вязкость достигает 80 Дж/см<sup>2</sup>. Улучшению свойств сталей, как и сварных соединений, способствует также термический отпуск при 760 °C.

Сварочный нагрев отрицательно влияет на пластичность хромистых ферритных сталей, усугубляет их склонность к хрупкому разрушению. Высокую хрупкость сварных соединений связывают с ростом величины зерна в ЗТВ.

**10.47. Химический состав хромистых ферритных сталей**

Марка стали	Массовая доля, %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	прочих элементов
08Х13	$\leq 0,08$	$\leq 0,80$	$\leq 0,80$	12,0... 14,0	-	$\leq 0,025$	$\leq 0,030$	$\geq 6(C+N) Ti$
08Х17Т				16,0... 18,0			$\leq 0,035$	$0,50...0,80 Ti$
08Х23С2Ю	$1,5...1,8$	$0,4...0,7$	$22,0...24,0$	$13,0...16,0$	$1,5...2,0$	$\leq 0,015$	$\leq 0,030$	Не регламентируется
04Х14Т3Р1Ф (ЧС-82)						$0,020$	$0,025$	$2,3...3,5 Ti, 1,1...1,8 V$
ЭП 882-ВИ	$\leq 0,015$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	16,5... 18,5	$\leq 0,020$	$\leq 0,025$	$0,15...0,35 Nb$	$0,1...0,4 Nb, 2,2...3,5 Al$
ЭП 904-ВИ	$\leq 0,012$	$\leq 0,3$		18				
15Х25Т	$\leq 0,08$	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	29,0... 27,0	$60$	$\leq 0,025$	$\leq 0,035$	$0,5...0,9 Ti$

**10. 48. Механические свойства хромистых ферритных сталей, не менее**

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KСU, Дж/см <sup>2</sup>	Примеры использования
08Х13	590	410	20	60	10	Внутренние устройства химических аппаратов
08Х17Т	372	—	17	—	—	
08Х23С2Ю	490		10	60	Змеевики пиролиза	
04Х14Т3Р1Ф	500	320	15	20	10	Стеллажи ядерного топлива, контейнеры
ЭП 882-ВИ	372	245	22	—	60	Заменитель Cr – Ni аустенитных сталей
ЭП 904-ВИ	440	323	24			Детали высокотемпературного оборудования
15Х25Т		—	14		20	Внутренние устройства химических аппаратов

Интенсивный рост зерна при сварке не удается предотвратить и у сталей с низким содержанием углерода и азота. Однако этот процесс не вызывает их охрупчивания в зоне термического влияния. Это свидетельствует о том, что хрупкость сварных соединений хромистых ферритных сталей связана главным образом с содержанием в твердом растворе примесей внедрения.

Образование ХТ в сварных соединениях хромистых ферритных сталей обусловлено

резким охрупчиванием металла в ЗТВ. В связи с этим сварку, гибку и правку при изготовлении узлов и деталей из сталей с обычным содержанием примесей рекомендуют проводить с нагревом до 150...200 °C. Существенному повышению пластичности сварных соединений способствует термический отпуск при 760 °C с последующим быстрым охлаждением (табл. 10.49).

Механические свойства сварных соединений зависят от применяемых сварочных материалов (табл. 10.50).

**10.49. Рекомендации по тепловому режиму сварки хромистых ферритных сталей**

Марка стали	Температура подогрева, °C	Время пролеживания до термической обработки	Термическая обработка
08Х13	150...250	Не ограничено	Отпуск при 680...700 °C
08Х13 (плакирующий слой биметалла)	Без подогрева	Не регламентируется	
08Х17Т, 15Х25Т	150...200		
08Х17Т, 15Х25Т (плакирующий слой биметалла)	Без подогрева		
08Х23С2Ю	200...250	Не допускается	Отжиг при 900 °C
ЭП 882-ВИ, ЭП 904-ВИ	Без подогрева	Не регламентируется	

**10.50. Способы сварки, сварочные материалы и механические свойства сварных соединений хромистых ферритных сталей**

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений		
		$\sigma_b$ , МПа	KСU, Дж/см <sup>2</sup>	
08Х13	РДС: – электроды Э-10Х25Н13Г2 ОЗЛ-6, ЦЛ-25, Э-10Х25Н13Г2Б ЦЛ-9, Э-08Х20Н15ФБ АНВ-9, Э-10Х20Н15Б АНВ-10	540	5	
	– электроды Э-2Х13 УОНИ-13НЖ, АНВ-1, ЦЛ-51			
	АДС: проводка Св-07Х25Н12Г2Т, Св-06Х25Н12ТЮ, Св-06Х25Н12БТЮ, флюс АН-26с, АНФ-14, ОФ-6, АН-18	540		
	АрДС: проводка Св-06Х25Н12Т, Св-06Х25Н12БТЮ, Св-07Х25Н12Г2Т, аргон			
08Х17Т	РДС: электроды Э-10Х25Н13Г2Б ЦЛ-9, УОНИ-10Х17Т. АДС: проводка Св-10Х17Т, флюсы АНФ-6, ОФ-6	440		
08Х23С2Ю	РДС: электроды ЦТ-33, ЦТ-38	500		
04Х14Т3Р1Ф	Электронно-лучевая и лазерная сварка			
ЭП 882-ВИ	РДС: электроды Э-10Х25Н13Г2 ЦЛ-25, ЦТ-45, ЭА-400/10Т. АрДС: проводка Св-02Х18М2Б-ВИ, аргон	372		
ЭП 904-ВИ	РДС: электроды ЦТ-52	390	–	
	АрДС: проводка Св-02Х19Ю3Б-ВИ, аргон	372	5	

Окончание табл. 10.50

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений	
		$\sigma_b$ , МПа	KСU, Дж/см <sup>2</sup>
15Х25Т	РДС: электроды ЗиО-7, ЭА-48М/22, АНВ-9, АН9-10. АрДС: проводка Св-07Х25Н13, аргон АДС: проводка Св-07Х25Н13, флюсы АН-26с, АНФ-14, ОФ-6, АН-16	440	5

При использовании аустенитных сварочных материалов металл шва отличается высокой пластичностью и ударной вязкостью. При сварке однородными с основным металлом сварочными материалами с обычным содержанием примесей внедрения металла шва и сварные соединения отличаются высокой хрупкостью. Лишь в случае низкого содержания примесей в присадочной проволоке при АрДС сталей ЭП 882-ВИ и ЭП 904-ВИ могут быть достигнуты высокие значения пластичности и ударной вязкости у металла шва.

Сварные соединения всех хромистых ферритных сталей коррозионно-устойчивы во многих агрессивных средах. Легирование металла шва ниобием (или титаном) обеспечивает стойкость против межкристаллитной коррозии как в исходном после сварки состоянии, так и после термической обработки.

#### 10.4.4. АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫЕ СТАЛИ

К аустенитно-ферритным сталим относят высоколегированные стали, основу структуры которых составляют две фазы: аустенит и феррит. Количество каждой из них обычно 40...60 %. В связи с этим признаком за рубежом такие стали называют дуплексными. Аустенитно-ферритные стали были разработаны как заменители хромоникелевых сталей аустенитного класса. Коррозионная стойкость этих сталей во многих агрессивных средах обеспечивается высоким содержанием хрома: как правило, >20 %.

В последние годы дуплексные стали находят за рубежом широкое применение в качестве конструкционного материала для теплообменного оборудования. Для таких конструкций хромоникелевые аустенитные стали мало пригодны вследствие склонности к хлоридному коррозионному растрескиванию. Дуплексные стали обладают также преимуществами перед сплавами на основе меди, которые

склонны к образованию питтингов и щелевой коррозии.

Формирование дуплексной структуры способствует значительному повышению прочности по сравнению со сталью с простой аустенитной структурой, обеспечивая при этом такие важные свойства, как стойкость против коррозионного растрескивания, питтингообразования и щелевой коррозии.

Среди легирующих элементов, определяющих стойкость сталей к питтингообразованию и щелевой коррозии, важнейшими являются хром, молибден, вольфрам и азот. Выбор марки стали зависит от условий среды (температуры, содержания кислорода и хлора, pH, скорости потока). Для оценки потенциальной стойкости стали против локальных видов коррозии используется так называемый эквивалент питтингообразования:

$$PRE = 1\% \text{ Cr} + 3,3\% \text{ (Mo} + 0,5 \text{ W}) + 16\% \text{ N.}$$

Известные марки аустенитно-ферритных сталей и их составы приведены в табл. 10.51.

Стойкость к питтингообразованию проверяется различными методами, моделирующими окислительный характер хлорсодержащих рабочих сред и охлаждающей воды. Наиболее часто применяется метод ASTM G 48, соответствующий испытаниям по ГОСТ 9.912-89, в 6%-ном растворе хлорного железа. При испытаниях определяется температура, при которой образуются питтинги с потерей массы образца, равной 1,0 г/м<sup>2</sup>/24 ч. В табл. 10.52 приведены сведения о коррозионной стойкости дуплексных сталей.

Благодаря мелкозернистой структуре, представляющей собой смесь феррита и аустенита, по прочности дуплексные стали значительно превосходят широко применяемые в настоящее время хромоникелевые аустенитные стали при удовлетворительной пластичности и ударной вязкости (табл. 10.53).

## 10.51. Химический состав аустенитно-ферритных сталей

Марка стали	Массовая доля, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	прочих элементов
03Х23Н6	≤0,030	≤0,4	1,0...2,0	22,0...24,0	5,3...6,3	—	—	≤0,020		
03Х22Н6М2					5,5...6,5	1,8...2,5				
08Х22Н6Т (ЭП 53)	≤ 0,08			21,0...23,0	5,3...6,3	—	5,6...0,65			
12Х21Н5Т (ЭП 811)	0,09...0,14		≤0,8		4,8...5,8	—	0,28...0,50			
08Х21Н6М2Т (ЭП 54)				20,0...22,0	5,5...6,5	1,8...2,5	0,20...0,40			
08Х18Г8Н2Т (КО-3)	≤0,08		7,0...9,0	17,0...19,0	1,8...2,8	—	0,20...0,50			
03Х24Н6АМ3 (ЗИ 130)		≤0,4	≤2,0	23,5...25,0	5,8...6,8	2,5...3,5		≤0,020		0,05...0,15 N
DMV 18.5 (UNS S31500)		1,4...2,0	1,2...2,0	18,0...19,0	4,25...5,25	2,5...3,0		≤0,030		0,05...0,10 N
DMV 22.5 (UNS S31803)			≤2,0	21,0...23,0	4,50...6,50	2,5...3,5		≤0,020		0,06...0,20 N
SAF 2304 (UNS S32304)		≤1,0	≤2,5		3,0...5,5	—		≤0,040	≤0,040	0,05...0,20 N
SAF 2205 (UNS S31803)			≤2,0	21,5...24,5	4,5...6,5	3,0...3,5		≤0,035		0,14...0,20 N
SAF 2507 (UNS S32750)		≤0,5	≤1,2			3,0...5,0		≤0,015		0,24...0,32 N
DMV 25.7N (UNS S32760)				24,0...26,0	6,0...8,0	3,0...4,0		≤0,030		0,20...0,30 N, 0,50...1,0 W
SAF 2906 (UNS S32906)		≤1,0	≤1,0	28...30	5...7	1,8...2,5		≤0,010		0,40 N

### 10.52. Сведения о коррозионной стойкости аустенитно-ферритных сталей

Марка стали	PRE (мини- мальный)	Минимальная температура склонности к локальной коррозии, °C		Область применения
		питтингооб- разование	щелевая коррозия	
03X23H6	22	<10		Химическая аппаратура. Заменитель стали 08X18H10T
03X22H6M2	27			Заменитель сталей 10X17H13M2T и 10X17H13M3T
08X22H6T	21			Заменитель стали 08X18H10T
12X21H5T	20			Заменитель сталей 10X17H13M2T и 10X17H13M3T
08X21H6M2T	26			Заменитель стали 08X18H10T
08X18Г8Н2Т	17			Заменитель стали 08X18H10T
03X24H6AM3	2,5	30	20	Теплообменники с морской водой
DMV 18.5	28	<10		Заменитель хромоникелевых аусте- нитных сталей
DMV 22.5	30	20	10	Теплообменники с технической пре- сной водой
SAF 2304	23	<10		Заменитель хромоникелевых аусте- нитных сталей
SAF 2205	34	30	20	Теплообменники с технической пре- сной водой
SAF 2507	38	80	50	Теплообменники с морской водой
DMV 25.7N			40	Выпарные аппараты каустической соды
SAF 2906	40			

**Примечание.** Все стали не склонны к межкристаллитной коррозии.

### 10.53. Механические свойства аустенитно-ферритных сталей, не менее

Марка стали	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>		
03X23H6	350	580	20	60		
03X22H6M2		550	18			
08X22H6T		600				
12X21H5T	380	660	20	50		
08X21H6M2T	350			60		
08X18Г8Н2Т						
03X24H6AM3	390	690	25			
DMV 18.5	350	600	100			
DMV 22.5	450	700	120			
SAF 2304	400	600	100			
SAF 2205	450	680				
SAF 2507	550	800				
DMV 25.7N	530	730				
SAF 2906	650	800				

Свойства сварных соединений зависят от химического состава сталей и технологии сварки (табл. 10.54), главным образом от погонной энергии при сварке. Для сварки

рекомендуются сварочные материалы, обеспечивающие получение ферритно-аустенитной или аустенитной структуры металла шва.

#### 10.54. Способы сварки, сварочные материалы и механические свойства сварных соединений аустенитно-ферритных сталей

Марка стали	Способ сварки, сварочные материалы	Механические свойства сварных соединений	
		$\sigma_b$ , МПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
03Х23Н6	РДС: электроды ЦЛ-11, ЦТ-15-1, ОЗЛ-7, АНВ-23. АДС: проводка Св-06Х21Н7БТ, Св-08Х21Н10АГ5, флюсы АН-26, АНК-45МУ	580	
03Х22Н6М2	РДС: электроды НЖ-13, АНВ-36, ЭА-902/14, ЭА-400/10. АДС: проводка Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-08Х19Н10М3Т, флюсы АН-26, АНК-45МУ		
08Х22Н6Т, 12Х21Н5Т	РДС: электроды Э-04Х20Н9Г2Б, Э-08Х19Н10Г2Б, 08Х22Н7Г2Б. АДС: проводка Св-06Х21Н7БТ, Св-07Х18Н9ТЮ, Св-05Х20Н9ФБС, флюсы АН-26с, 48-ОФ-6	60	
08Х21Н6М2Т	РДС: электроды Э-09Х19Н10Г2М2Б, Э-07Х19Н11М3Г2Ф, 08Х20Н7Г2М2Б. АДС: проводка Св-08Х19Н10М3Б, Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-03Х24Н6АМ3, флюсы АН-26с, 48-ОФ-6		
08Х18Г8Н2Т	РДС: электроды Э-08Х20Н9Г2Б, Э-08Х19Н10Г2Б, 08Х22Н7Г2Б. АДС: проводка Св-06Х21Н7БТ, Св-05Х20Н9ФБС, Св-08Х20Н9С2БТЮ, флюсы АН-26с, 48-ОФ-6	600	
03Х24Н6АМ3	РДС: электроды ОЗЛ-37, ОЗЛ-41	650	100
SAF 2304, DMV 22.5, SAF 2205	РДС: электроды Sandvik 22.9.3LR	700	60
	АрДС: проводка Sandvik 22.9.3L, аргон, аргон + 2 % N		100
SAF 2507, DMV 25.7N	РДС: электроды Sandvik 25.10.4LR	800	50
	АрДС: проводка Sandvik 25.10.4L, аргон, аргон + 2 % N		100

В России аустенитно-ферритные стали применяют в основном в качестве заменителей хромоникелевых аустенитных сталей. В связи с этим для сварки сталей-заменителей используют аустенитные присадочные материалы. Зарубежные марки дуплексных сталей сваривают, как правило, с применением сварочных материалов с химическим составом, близким к основному металлу.

Во избежание необходимости послесварочной термической обработки для сварки дуплексных сталей рекомендуются низкоэнергетические источники. Термовложения при сварке не должны превышать 2,5 кДж/мм. При этом температура изделия в процессе сварки не должна быть  $>150\ldots250$  °C.

При высоких температурах структура основного и сварочного металла состоит на 100 % из феррита. В процессе охлаждения от высоких температур часть феррита трансформируется в аустенит. Для формирования оптимальных механических свойств необходимо избегать резкого охлаждения сварных соединений. Оптимальный режим сварки можно рассчитать, используя зависимость термовложения от сварочных параметров:

$$Q = \frac{60U I_{\text{св}}}{1000v_{\text{св}}},$$

где  $U$  – напряжение дуги, В;  $I_{\text{св}}$  – сварочный ток, А;  $v_{\text{св}}$  – скорость сварки, мм/мин.

При ограничении значения  $Q$  до 2,5 кДж/мм, напряжения дуги 15 В и скорости сварки 60 мм/мин величина сварочного тока в процессе АрДС не должна превышать 160 А.

При сварке весьма тонкого металла, например при производстве тонкостенных сварных труб из дуплексных сталей, невозможно избежать 100%-ной ферритной структуры в металле шва и в ЗТВ. Поэтому после сварки сварные трубы подвергают термической обработке путем нагрева до 1050…1100 °C с последующим быстрым охлаждением. В указанном интервале температур ~50 % феррита превращается в аустенит, что обеспечивает высокую пластичность сварным соединениям.

## 10.5. СВАРКА НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

### 10.5.1. ХАРАКТЕРИСТИКА НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Никель – тяжелый цветной металл, имеющий плотность 8,8 г/см<sup>3</sup>, температуру плавления 1455 °C и температуру кипения 3050 °C. Он сохраняет при любых температурах наиболее

плотную гранецентрированную кубическую кристаллическую (ГЦК) решетку, что обеспечивает высокую температуру рекристаллизации из-за малой диффузионной подвижности его атомов. Этот металл обладает хорошей коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах и высокими механическими свойствами при криогенных температурах. Никель широко применяется как конструкционный материал, а также как основа различных сплавов: никромов (70…80 % Ni + Cr); пермаллоев (80 % Ni + Fe); никроферов (40 % Ni + 20 % Cr + Fe); монель-металла (70 % Ni + Cu) и др., с более сложным легированием, позволяющим получить наряду с жаропрочными окалино- и коррозионно-стойкие сплавы, способные длительно работать при температурах 1000…1100 °C в газовых, соляных и жидкотемпературных средах. Химический состав высоколегированных никелевых сплавов представлен в табл. 10.55.

Никелевые сплавы делят на две группы: гомогенные нетермоупрочняемые и гетерогенные термоупрочняемые дисперсионным твердением.

Гетерогенные термоупрочняемые сплавы никеля могут иметь несколько исходных состояний. В закаленном состоянии сплавы наименее жаропрочны, но наиболее пластичны (в том числе отличаются хорошей штампуемостью и другими технологическими свойствами). В дисперсионно-упрочненном (состаренном) состоянии пластичность минимальна, а жаропрочность максимальна и зависит от объема, химического состава и морфологии упрочняющих фаз.

В перестаренном состоянии (старение при повышенных температурах) сплавы имеют промежуточные значения жаропрочности и пластичности вследствие коагуляции упрочняющих фаз. Металл во всех исходных состояниях имеет крупнозернистое строение, формирующееся в результате рекристаллизации обработки при высокотемпературном нагреве под закалку ( $T = 1200\ldots1250$  °C).

Главная роль в обеспечении жаропрочности никелевых сплавов принадлежит  $\gamma'$ -фазе, общее количество которой пропорционально содержанию Ti + Al или Nb + Al. При  $\Sigma(Ti, Al) > 8$  % массовая доля  $\gamma'$ -фазы достигает 60 %. Под  $\gamma'$ -фазой понимают интерметаллиды типа: Ni<sub>3</sub>(Ti, Al); Ni<sub>3</sub>Al; Ni<sub>3</sub>(Nb, Al), имеющие ГЦК-решетку. Они когерентны с  $\gamma'$ -фазой – основой сплава, выделяются в объеме матрицы при старении и обеспечивают дисперсное твердение сплава.

## 10.55. Химический состав высоколегированных никелевых сталей (массовая доля, %)

Марка сплава	C	Mn	Si	S	P	Cr	W	Ti	Al	Другие элементы	Области применения
	не более										
ХН77ТЮ	0,06	0,4		0,007		19...22	—	2,3...2,7	0,55...0,95	До 4,0 Fe + 0,01 Ce	Диски турбин, газоводы
ХН70ВМТЮ (ЭИ 617)	0,12		0,6			13...16	5...7	1,8...2,3	1,7...2,3	До 5,0 Fe; 0,02 B; 0,02 Ce; 2,0...4,0 Mo; 0,1...0,5 V	
ХН67ВМТЮ	0,08		0,5		0,01	17...20	4...5	2,2...2,8	1,0...1,5	До 4,0 Fe; 0,01 B; 0,01 Ce; 4 Mo	
ХН60ВМТЮ (ЭП 539)	0,09			0,5		17...19	2,5...4,0	2,3...3,0	3,0...4,0	До 4,0 Fe; 0,02 B; 0,02 Ce; 5...7 Mo	
ХН75ВМТЮ (ЭИ 602)	0,08		0,8	0,02		19...22	—	0,35...0,75	0,35...0,75	До 3,0 Fe; 0,2 Cu; 1,6...2,3 Mo; 0,9...1,3 Nb	Камеры сгорания
ХН70ВМТЮ (ЭП 99)	0,1		0,4		0,015	18...22	6...8	1,0...1,5	2,5...3,5	До 5,0 Fe; 0,005 B; 0,002 Ce; 5...8 Co; 3,5...5 Mo	Сопловые лопатки
ХН62МБВЮ		—				13...15	4...5	—	0,9...1,4; 0,02	8...10 Fe; 4,5...5,5 Mo; 5,1...5,9 Nb; 0,02 Ce; <0,015 Zr	
Нимоник 80А	0,1	1	1			18...21		1,8...2,7	0,5...1,8	До 5,0 Fe; 2,0 Co	Лопатки турбин
Инконель 718 (США)	0,04	0,18	0,27			17		1	0,3	19,0 Fe; 3,0 Mo; 0,1 Co; 0,0025 B; 2...5(Nb + Ta)	Детали обшивки ракет
Рене 41	0,12					19		3	1,52	1,0 Fe; 0,05 B	Диски турбин, газоводы
Удимет-700 (США)	0,15					13...17		3,0...4,0	3,75...4,75	1,0 Fe; 0,10 B; 17...20 Co; 4,5...5,75 Mo	Лопатки турбин
Хастелой Н (США)	0,5	0,8	0,1	0,002	0,015	6,0...8,0		0,5	2	≤5,0 Fe; 16...18 Mo	Трубопроводы для агрессивных сред
MAR M211 (США)		0,15		0,2		9	5,5	2		≤1,5 Fe; 10,0 Co; 2,5 Mo; 2,7 Nb; 0,05 Zr; 0,015 B	Лопатки и литые роторы
Нимоник 115				—		15	—	4		3 Mo; 15 Co	Лопатки газовых турбин
ЖС6К	0,2		0,4			10,5...12,5	4,5...5,5	2,5...3,0	5,0...6,0	≤2,0 Fe; 0,02 B; 4,0...5,0 Co; 3,5...4,5 Mo	Лопатки и литые роторы
H70M27Ф (ЭП 496)		0,05	0,5	0,2		0,3	—			25...29 Mo; 4,0 Fe; 1,4...1,7 V	Трубопроводы для агрессивных сред
0XH65M16B (ЭП 567)			1	0,15		14,5...16,5	3,0...4,5			≤1,0 Fe; 15...17 Mo	

Примечание. Остальное – никель, %.

В комплексно-легированных сплавах  $\gamma'$ -фаза имеет сложный состав, так как никель и алюминий могут замещаться другими элементами. Положительное влияние на механические свойства  $\gamma'$ -фазы состоит в том, что она выделяется преимущественно в объемах зерен при температурах 600...950 °C в виде большого числа когерентных мелкодисперсных частиц, создает эффективные барьеры для движения дислокаций и, значит, препятствует высокотемпературной ползучести. В то же время  $\gamma'$ -фаза значительно пластичнее карбидов, а прочность ее возрастает с увеличением температуры.

Наряду с основными фазами возможно образование ряда побочных некогерентных фаз, которые, выделяясь по границам зерен вследствие сегрегации или ликвации, приводят к охрупчиванию сплавов:  $\eta$ -фаза ( $Ni_3Ti$ ),  $\sigma$ -фаза ( $FeCr$ ), карбиды ( $Me_{23}C_6$  и  $Me_6C$ ), бориды ( $Me_3B_2$ ).

#### 10.5.2. СВАРИВАЕМОСТЬ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**Структура, свойства металла шва и ЗТВ.** Кристаллизация металла сварочной ванны приводит к образованию однофазной аустенитной структуры металла с ГЦК-решеткой, обладающей повышенным коэффициентом линейного сокращения, высокой релаксационной стойкостью и ликвационной неоднородностью. Это увеличивает протяженность кристаллизационного и диффузионно-дислокационного температурных интервалов хрупкости  $TiX_1$  и  $TiX_2$  соответственно, повышает сварочные деформации и напряжения и, тем самым, обуславливает пониженную свариваемость никелевых сплавов, особенно низкую у сверхжаропрочных сплавов.

Первичная структура металла шва высоколегированных никелевых сплавов формируется зарождением на подложке – оплавленных крупных зернах основного металла – столбчатых кристаллитов, конкурентный рост которых

приводит к выклиниванию одних, ограничению других, неблагоприятно ориентированных кристаллитов и прекращению их роста. Данная особенность однофазной кристаллизации обусловлена значительной шириной слоя термо-концентрационного переохлаждения и прерывистой кристаллизацией в этом слое с нарушением закона ортогональности. Она вызывает резкое укрупнение кристаллитов в швах и является первым фактором повышенной склонности к ГТ и общего понижения свариваемости.

**Второй фактор** – высокий уровень легирования расплава; он обуславливает в литом металле на периферии шва ячеисто-дендритный и дендритный (в центре шва) типы субструктурь со значительно выраженной ликвационной неоднородностью, измеряемой коэффициентом  $k_c = c_0 / c_m$ , где  $c_0, c_m$  – содержание элементов на периферии шва и в его центре соответственно (табл. 10.56), и с образованием неравновесных легкоплавких ликватов, расширяющих  $TiX_1$ . Так, эвтектика соединения  $NiO - NiS$  затвердевает при температуре 645 °C, образуя жидкие прослойки по зонам срастания кристаллитов, где возникают ГТ в  $TiX_1$  (рис. 10.26).



Рис. 10.26. ГТ кристаллизационного типа в металле шва никелевого сплава X20H80T.  
Увеличение 200<sup>х</sup>

#### 10.56. Химическая неоднородность металла шва

Марка стали	Коэффициенты неоднородности $k_c = c_0 / c_m$					
	Fe	Cz	Ni	Mn	Mo	Nb
X20H45M2Г6Б	1,28	1,23		0,55	0,5	0,066
X20H45M6Г2Б	1,29	1,19	1,1	0,47	0,59	0,08
X20H45M6Г6Б	1,17	1,3		0,6	0,58	0,14

Следствием ликвации является неоднородность химического состава, приводящая к образованию в шве менее эффективных интерметаллических фаз по сравнению с фазами в основном металле. К примеру, в результате преимущественной ликвации титана в зонах ликвации при старении выделяется неизоморфная с матрицей фаза  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ , имеющая меньшие жаропрочность и тугоплавкость, чем  $\gamma'$ -фаза.

*Третий фактор* – транскристаллитность швов, в центре которых на больших скоростях сварки формируется зона «слабины» – стык двух фронтов кристаллизации под большим углом между осями кристаллитов с явно выраженной зональной ликвацией (рис. 10.27, а). При малых скоростях сварки также велик угол срастания кристаллитов, поскольку в центре шва образуются осевые кристаллиты, по продольным граням которых возникают две зоны срастания боковых и осевых кристаллитов. Такое строение шва также характеризуется пониженной технологической и эксплуатационной прочностью (рис. 10.27, б).

Изменения структуры сплавов в ЗТВ:

- укрупнение зерна в гомогенных сплавах в результате рекристаллизации обработки и сорбирательной рекристаллизации под действием термодеформационного цикла сварки;
- растворение упрочняющих фаз гетерогенных сплавов в зоне, нагреваемой  $>900^\circ\text{C}$ , фиксируемое по падению твердости и снижению жаропрочности (рис. 10.28);
- перестаривание (при сварке состаренных сплавов), приводящее к укрупнению упрочняющих фаз и снижению механических свойств;

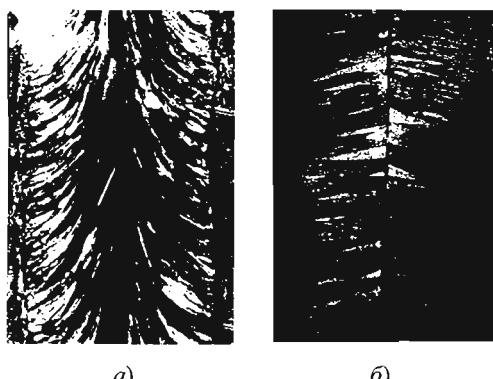


Рис. 10.27. Структура шва при большой (67 м/ч) и малой (6 м/ч) скоростях сварки сплава X20H80T, толщина 2 мм (соответственно а и б). Увеличение 5<sup>х</sup>

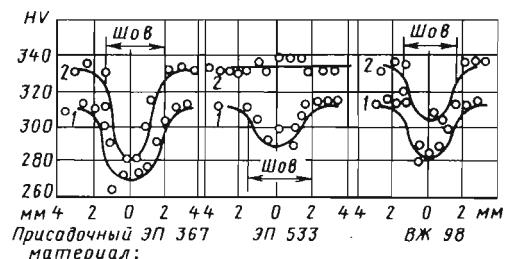


Рис. 10.28. Изменение твердости в зоне шва при аргонодуговой сварке сплава ХН67ВМТЮ:

1 и 2 – шов в исходном состоянии и после термообработки соответственно



Рис. 10.29. ГТ по ликвационным прослойкам в ЗТВ при аргонодуговой сварке сплава ХН67ВМТЮ толщиной 30 мм. Увеличение 200<sup>х</sup>

– оплавление упрочняющих фаз в перестаренных сплавах, приводящее к образованию горячих микронадрывов в ЗТВ и падению жаропрочности (рис. 10.29).

Развитие указанных негативных явлений зависит от длительности высокотемпературного нагрева, исходного состояния сплава и его химического состава, определяющего стабильность фаз при нагреве.

#### 10.5.2.1. ТРЕЩИНЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

*Трещины при сварке.* При сварке гомогенных никелевых сплавов (типов X20H45, XН69ВТ, XН78Т) возможно образование кристаллизационных, а также подсолидусных ГТ в металле шва. Последние имеют диффузионную природу и образуются в результате развития высокотемпературной дислокационной ползучести в металле шва с неравновесной структурой.

При сварке гетерогенных сплавов наряду с возникновением ГТ в шве более вероятно их

появление в ЗТВ (см. рис. 10.29), где велика протяженность ТИХ<sub>1</sub> из-за наличия легкоплавких ликватов (сульфидов, боридов и т.д.), значительно температурные деформации вследствие высокой жаропрочности сплавов и мала пластичность ввиду крупнозернистой структуры, формирующейся при нагреве под закалку до 1250 °С.

Металлургические способы предотвращения ГТ:

- повышение чистоты сплавов по примесям (переплав, гранульная металлургия) (табл. 10.57);

- ограничение полноты рекристаллизации при прокатке сплавов, позволяющее инициировать рекристаллизацию при сварке и, соответственно, снизить сегрегацию в условиях ускоренной миграции границ зерен в ЗТВ при сварке;

#### 10.57. Влияние способа выплавки на сопротивляемость ГТ при сварке сплава X20H45M4B3БГ

Способ выплавки	$T_{\text{н.г.}}$ , °C	ТИХ, °C	$v_{\text{кр}} \cdot 10^5$ , м/с
В индукционных печах	1238	100	0,95
ВДП	1268	71	1,02
ЭШП	1277	57	1,21

Условные обозначения: ВДП и ЭШП – соответственно вакуумно-дуговой и электрошлаковый переплавы;  $T_{\text{н.г.}}$  – нижняя граница ТИХ<sub>1</sub>.

- сварка в закаленном (аустенитизированном) или перестаренном состоянии (значение критической скорости  $v_{\text{кр}}$ , несмотря на неизменность химического состава шва, при сварке в аустенитизированном состоянии повышается в 1,5 – 2 раза вследствие пониженной прочности сплава);

- перестаривание сплавов, которое укрупняет  $\gamma'$ -фазу и повышает ее термостойкость при сварочном нагреве, ослабляя разупрочнение в ЗТВ и расплавление фаз по границам зерен.

Технологические способы предотвращения трещин при сварке:

- снижение до минимума погонной энергии (многопроходная сварка неплавящимся электродом, электронно-лучевая, лазерная и импульсно-дуговая сварка);

- ограничение скорости сварки до значений, при которых кристаллиты в центре шва срастаются боковыми гранями под малым углом;

- применение электромагнитных полей и других внешних воздействий для измельчения элементов первичной структуры;

- применение теплоотводящей оснастки и охлаждающих сред (подача паровоздушной смеси на сварочную ванну);

- оптимизация химического состава шва путем оценки технологической прочности вариантов по ГОСТ 26389–84.

Сопротивляемость образованию ГТ наиболее употребляемых присадок приведена в табл. 10.58.

#### 10.58. Сопротивляемость металла шва образованию ГТ и его длительная прочность при 800 °C

Состав шва	$v_{\text{кр}}$ , мм/мин	$\sigma_d$ , МПа	
		после сварки	после выдержки при 700 °C в течение 16 ч
ЭП 435 (Св-ХН78Т)	1,0	50	–
ЭП 602 (Св-ХН75МБТЮ)	2,4	–	
ЭП 868 (Св-ХН60ВТ)	3,0	90	
ЭП 367 (Св-06Х15Н60М15)	4,5	100	
ЭП 533 (Св-08Х20Н57М8В87)	4,0	–	230
ЭП 595 (Св-Х11Н60М23)	10,0	120	160

*Трешины при послесварочной термообработке.* Термообработка сварных соединений проводится с целью снятия сварочных напряжений, а для гетерогенных термоупрочняемых сплавов – и для восстановления жаропрочности в сварном соединении. Наиболее эффективно сочетание закалки и старения. Однако на этапе медленного нагрева под закалку (1200...1250 °C) сварных конструкций, имеющих всегда внутренние напряжения, и выдержки в интервале дисперсионного твердения возникают трещины. Они вызваны совпадением во времени деформаций металла при релаксации сварочных напряжений от уменьшения его объема при дисперсионном твердении и охрупчивания от упрочнения зерен. Это обуславливает внутризеренное, а затем межзеренное проскальзывание по границам зерен, приводящее к хрупкому разрушению сварного соединения параллельно оси шва по ЗТВ, поперек шва (трещины типа частокол), а при сварке толстолистового металла – трещины в ЗТВ, ориентированные ортогонально к линии сплавления.

Наиболее склонны к образованию трещин при термообработке сварные соединения повышенной геометрической жесткости, а также соединения из сплавов с  $\Sigma(Ti + Al) > 4\%$ , имеющие максимальный темп старения. Сравнительная оценка склонности сплавов к таким разрушениям при термообработке дана на рис. 10.30. Главная причина трещин при термообработке сварных конструкций состоит в оплавлении границ зерен в ЗТВ при сварочном нагреве, которое инициирует сегрегацию легирующих и примесных атомов на границы, а после затвердевания – миграцию границ с выходом из обогащенной зоны и образование обедненной периферии зерен, где понижена жаропрочность и развивается высокотемпературная ползучесть по механизму межзеренного проскальзывания.

В сплавах, легированных ниобием вместо титана, ослаблена интенсивность старения. Это позволяет на первом этапе старения снизить сварочные напряжения ускорением механизма релаксации в шве и ЗТВ, а на втором – повысить жаропрочность соединения старением, приблизив его к прочности основного металла. Такие сплавы, например XН62МБВЮ с упрочняющей  $\gamma'$ -фазой  $Ni_3(Nb, Al)$ , не склонны к образованию трещин в процессе термообработки при сохранении значительной жаропрочности до 800 °C. Они эффективны и в качестве сварочных материалов при соединении

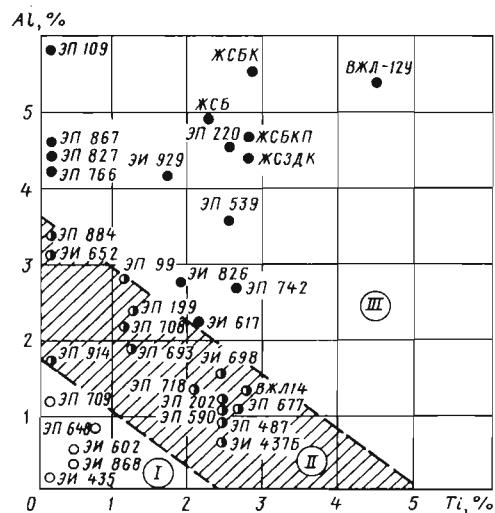


Рис. 10.30. Сравнительная оценка склонности сварных соединений различных сплавов к образованию трещин при термообработке:  
I, II – соответственно хорошо и удовлетворительно свариваемые сплавы; III – сплавы, не подлежащие сварке плавлением

сплавов, упрочненных титаном и алюминием. Способствуют предотвращению трещин при термообработке также все способы рафинирования сплавов, измельчения зерна в ЗТВ, снижения сегрегации по их границам, сведения к минимуму (до 1,5 с) времени высокотемпературного нагрева при сварке и повышения скорости нагрева при проведении послесварочной термообработки  $\leq 60$  °C/мин, что препятствует развитию старения в стадии нагрева.

#### 10.5.2.3. ОХРУПЧИВАНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Высокотемпературное охрупчивание.* В процессе длительной высокотемпературной эксплуатации снижается предел длительной прочности и пластичность основного металла и сварных соединений. Однако интенсивность их снижения выше для металла шва и ЗТВ, особенно в условиях циклического высокотемпературного нагружения, из-за:

- изменения морфологии  $\gamma'$ -фазы в результате высокотемпературной деформации при сварке, приводящего к пластинчатой форме выделений  $\eta$ -фазы с ромбической решеткой, некогерентной матрице;

- преобразования первичных карбидов  $MeC$  во вторичные  $Me_6C$  и  $Me_{23}C_6$ , имею-

щие пластинчатую форму и выпадающие на границах;

- образования оксидов  $\text{Me}_2\text{O}$  вследствие диффузионного окисления сплавов по межзеренным границам;

- разнозернистости металла в ЗТВ от сварочного перегрева;

- концентрации высокотемпературной ползучести в металле шва и ЗТВ, межзеренного проскальзывания, приводящего к зарождению трещин у включений и ступенек, образовавшихся на границах при выходе дислокаций.

Чем короче длительность высокотемпературного нагрева при сварке и меньше разница в сопротивлении деформированию металла шва, ЗТВ и основного металла, тем слабее развиваются указанные необратимые изменения, выше эксплуатационные свойства и свариваемость сплавов.

*Охрупчивание металла под воздействием агрессивных сред.* Оно вызывается преимущественно сульфидной и межкристаллитной коррозией. Сульфидная коррозия связана с образованием легкоплавких сульфидов никеля  $\text{NiS}$  ( $T_{\text{пл}} = 810^\circ\text{C}$ ) при наличии в высокотемпературном газовом потоке сернистых соединений. Сульфиды имеют больший объем, что вызывает разрыхление металла и проникновение сульфидов на границы зерен, особенно сильное в восстановительных средах, где нет плотных оксидных защитных пленок. Чем крупнее зерно в металле шва и ЗТВ, чем больше сварочные напряжения и длительность высокотемпературного нагрева при сварке, тем ниже стойкость сварных соединений против сульфидной коррозии по отношению к основному металлу.

Межкристаллитная коррозия сварных соединений отличается от основного металла локальностью. Она сосредоточена в ЗТВ и развивается вдоль линии сплавления по указанным границам зерен, претерпевшим нагрев  $>1250^\circ\text{C}$  и частичное оплавление, а также провокационный повторный нагрев в интервале  $550...900^\circ\text{C}$  (сенсибилизацию) либо замедленное охлаждение после сварки в указанном интервале температур.

Рост зерен при сварочном нагреве, совершающийся диффузионным путем, приводит к накоплению на границах элементов с малой диффузионной подвижностью. Наименее подвижны атомы титана. Накопление этих элементов должно вызывать локальное снижение температуры плавления и обогащать границы примесями из-за большей растворимости элементов в жидкой фазе. После затвердевания

границы возможны продолжение миграции и уход границы из зоны обогащения, где при повторном нагреве формируются карбиды и интерметаллиды. Подавлению склонности швов к межкристаллитной коррозии способствуют легирование ниобием, исходя из соотношения  $\text{Nb}/\text{C} \geq 20$  при работе соединений  $<550^\circ\text{C}$  и  $\text{Nb}/\text{C} \geq 40$  при более высоких температурах длительной эксплуатации, ограничение содержания углерода ( $\leq 0,03...0,06\%$ ) и аустенитизация сварных соединений.

*Радиационное охрупчивание.* Под воздействием нейтронов,  $\alpha$ -частиц в кристаллической решетке металлов образуются гелиево-водородная фаза и вакансии, так как атомы твердого тела выбиваются из своих регулярных положений и переходят в междуузлия, что способствует развитию диффузионных процессов, возникновению пор и трещин и снижает пластичность. Высокотемпературные свойства под действием облучения изменяются по различным законам в зависимости от химического состава сплавов и его структуры. Наиболее сильно снижаются длительная прочность у дисперсионно-твердеющих сплавов (особенно для сварных швов), содержащих цветные металлы: кобальт, бор и др. Значительно меньшее влияние оказывает нейтронный поток на гомогенные сплавы, не склонные к дисперсионному твердению. Их свойства восстанавливаются после отжига при  $0,57T_{\text{пл}}$ , К.

Свариваемость облученного материала (что важно при разработке ремонтной технологии ядерного оборудования) также понижена в связи с повышенной склонностью к порообразованию, а также возникновению ГТ в ЗТВ по механизму гелиевой хрупкости. Выбор сварочных материалов и технологии должен быть направлен на снижение гетерогенности швов и концентрации высокотемпературных деформаций, влияющих не только на появление ГТ, но и на длительную прочность сварных соединений по закону технологического наследования дефектов кристаллического строения.

### 10.5.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ

#### 10.5.3.1. ВЫБОР СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ

При сварке плавлением гомогенных сплавов главная проблема выбора режимов – сохранение жаропрочных свойств сплавов в зоне сварки, а при сварке гетерогенных сплавов – и предотвращение трещин в процессе послесварочной термообработки.

Наиболее общий принцип выбора режимов – максимально возможное сокращение времени высокотемпературного нагрева, увеличение скорости охлаждения и уменьшение размеров сварочной ванны, снижение сварочных напряжений. Указанные требования выполняются при сварке наиболее концентрированным источником энергии – лазерным или электронным лучом на скорости  $\leq 50$  м/ч.

Однако при однопроходной дуговой и электронно-лучевой сварке с большой скоростью металла средних и больших толщин имеет место повышенная склонность к образованию ГТ в ЗТВ, ориентированных по ортогонали к линии сплавления в поперечном сечении шва (см. рис. 10.29). При электронно-лучевой сварке наибольшая вероятность их образования – в зоне перегиба линии сплавления, под «грибком» (см. рис. 10.31). Выявлено, что трещины данного типа вызваны малой теплопроводностью и большой жаропрочностью сплавов, приводящих к несинхронности в развитии пика сварочных деформаций по отношению к пику температур. В результате этого наибольший темп растягивающих деформаций в металле ЗТВ развивается в период затвердевания легкоплавких ликватов и сегрегатов в ЗТВ. Образование шва с грибком усиливает это явление тем, что горячий металл, выдавленный избыточным давлением в парогазовом канале из сварочной ванны, является для верхних слоев ЗТВ вторым источником нагрева, действующим в период пика растягивающих температурных деформаций.

Рекомендовано для предотвращения ГТ в ЗТВ при дуговой сварке снижать скорость сварки, а при электронно-лучевой еще уменьшать грибовидность формы шва, переходя к швам кинжалной формы, путем специальной

фокусировки луча с двойным преломлением. В ряде случаев возможна оптимизация разделки, в том числе создание припуска в зоне грибовидности шва после сварки. Наиболее эффективным переходом к благоприятной форме шва является сварка толстолистового металла горизонтальным лучом, резко снижающим давление в парогазовом канале, особенно при сварке с присадкой по щелевому зазору 0,5...1 мм.

Выбор режимов сварки давлением обусловлен более высокой жаропрочностью сплавов и большим электросопротивлением. Поэтому с увеличением доли легирующих элементов давление на электродах повышают, а силу тока снижают. Чтобы уменьшить перегрев, электроды и изделие помещают в воду или омывают струями воды. Перед сваркой поверхности деталей тщательно зачищают или обезжиривают травлением.

Сплавы с  $(Ti + Al) > 4\%$  являются плохосвариваемыми. Такие сплавы рекомендуют соединять диффузионной сваркой и пайкой.

*Выбор сварочных материалов.* При выборе сварочных материалов необходимо исходить из предотвращения ГТ в шве и ЗТВ, трещин при термообработке, а также обеспечения равной жаропрочности сварных соединений и основного металла. При сварке гомогенных сплавов применяют присадочные проволоки, близкие по химическому составу к основному. Отличия состоят в увеличении доли элементов, повышающих энергию активации процессов диффузии (молибден, вольфрам, марганец), и в уменьшении упрочняющих добавок (титан, алюминий).

Типовые составы присадочных материалов приведены в табл. 10.59.

При сварке гетерогенных сплавов с большим содержанием титана и алюминия используют присадочные проволоки, в которых часть титана заменена ниобием. Это обеспечивает снижение интенсивности упрочнения шва при нагреве под закалку по отношению к основному металлу с ускоренным старением.

*Выбор режимов послесварочной термообработки.* Для гомогенных сплавов рекомендуется аустенитизация сварных узлов при температуре 1050...1200 °C, которая приводит к растворению избыточных фаз, а также к снятию сварочных напряжений, что повышает работоспособность сварных соединений в коррозионных средах (табл. 10.60). При сварке гетерогенных дисперсионно-упрочняемых сплавов послесварочная термообработка включает аустенитизацию и стабилизирующий отжиг. Более



Рис. 10.31. Типовая геометрия шва, полученного электронно-лучевой сваркой, с ГТ в ЗТВ (под грибком), сплав ХН67ВМТЮ толщиной 27 мм.

Увеличение 5<sup>х</sup>

## 10.59. Типовые составы присадочных материалов

Марка сплава	Массовая доля, %													
	C	Si	Mn	P	S	W	Cr	Mo	Fe	B	Al	Ti	Nb	
ВЖ 98	0,1	0,8	0,5	0,005	0,01	13...16	23,5...26,0	—	0,4	—	—	—	—	
ЭП 683		1,0	0,02	0,02	—	14,0...16,0	18,0...21,0	0,6	0,3...0,55	—				
ЭП 367	0,04	1,0...2,0	0,015	0,01	—	14,0...16,0	4,0	—	—	—	0,3...0,7	—	—	
ЭП 533					7,0...9,0	19,0...22,0	7,0...9,0	3,0	0,005	0,04				
ЭП 648	0,1	0,4	0,5	—	4,3...5,3	32,0...35,0	2,3...3,3	4,0	0,008	0,5...1,1	0,5...1,1	0,5...1,1	—	—

## 10.60. Жаропрочность сварных соединений никелевых сплавов

Сплав	Способ сварки	Испытуемый образец	Условия испытания		Время до разрушения, ч	Место разрушения		
			температура, °C	напряжение, МПа				
ХН77ТЮР (ЭП 437Б)	—	Основной металл	700	44	115	Основной металл		
ХН77ТЮР (ЭП 437Б)	ЭЛС**	Сварное соединение			89	По шву		
ХН77ТЮР (ЭП 437Б)	АДС***				30			
XH60BT	—	Основной металл	800	10	128/182*	Основной металл		
XH60BT	ЭЛС	Сварное соединение			203/115*	По шву		
XH67МВТЮ (ЭП 202)	—	Основной металл		25	130	Основной металл		
XH67МВТЮ (ЭП 202)	ЭЛС	Сварное соединение	900	60	110			
X35H50ВМ (ЭП 648)	—	Основной металл		50	100			
X35H50ВМ (ЭП 648)	Лазерная без присадки	Сварное соединение			182			

\* Аустенитизация 1200 °C в течение 1 ч на воздухе.

\*\* Электронно-лучевая сварка.

\*\*\* Аргонодуговая сварка.

эффективна двукратная обработка, которая формирует глобулярную структуру карбидов и  $\gamma'$ -фазы по границам. Последующее двухступенчатое старение при  $900^{\circ}\text{C}$  в течение 8 ч и при  $850^{\circ}\text{C}$  в продолжение 15 ч способствует выделению  $\gamma'$ -фазы в объемах зерен и стабилизирует структуру для последующей высокотемпературной эксплуатации, но не изменяет морфологию карбидов.

#### 10.5.4. ЖАРОПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ

На рис. 10.32 приведены результаты сравнительных исследований кратковременной и длительной прочности сварных соединений сплава ЭП 202, полученных лучевыми и дуговыми способами сварки.

Наиболее высокие свойства соединений дает электронно-лучевая сварка, а худшие – ручная аргонодуговая сварка. Автоматическая аргонодуговая сварка обеспечивает средние свойства соединений.

Существенно влияет на кратковременную прочность химический состав присадочных материалов. Наименее прочны соединения, полученные с применением гомогенной присадочной проволоки ЭП 367 (см. табл. 10.58).

Более высокие свойства отмечены при использовании проволоки ВЖ 98, содержащей вольфрам, и ЭП 583, легированной молебденом и бором. Наиболее прочные соединения получаются в случае применения проволоки ЭП 533, содержащей вольфрам, молебден, титан и алюминий. Преимущества электронно-лучевой сварки и проволоки ЭП 533 подтверждены также и при испытаниях длительной прочности (см. рис. 10.32, б). Однако проволока ЭП 533 уступает другим по стойкости против образования трещин при сварке (см. табл. 10.58).

Сравнение механических свойств соединений из различных сплавов приведено в табл. 10.60.

Высококачественные сварные соединения гомогенных никелевых сплавов характеризуются высокими значениями жаропрочности и сопротивляемости термической усталости. Более существенно снижаются при аргонодуговой сварке жаропрочные свойства для сварных соединений гетерогенных сплавов по сравнению с основным металлом. При этом электронно-лучевая и лазерная сварки дают соединения, мало отличающиеся от основного металла.

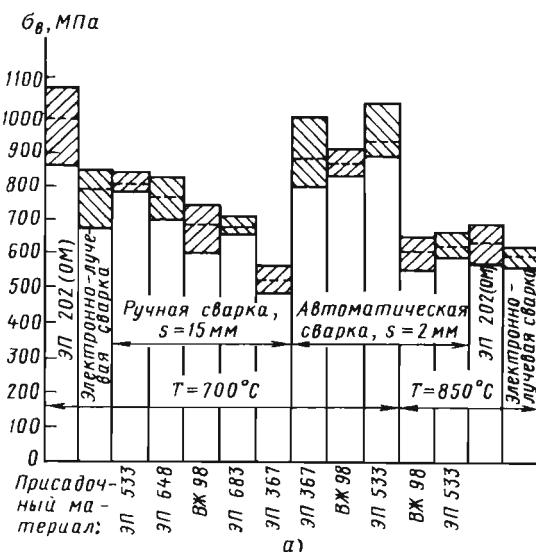
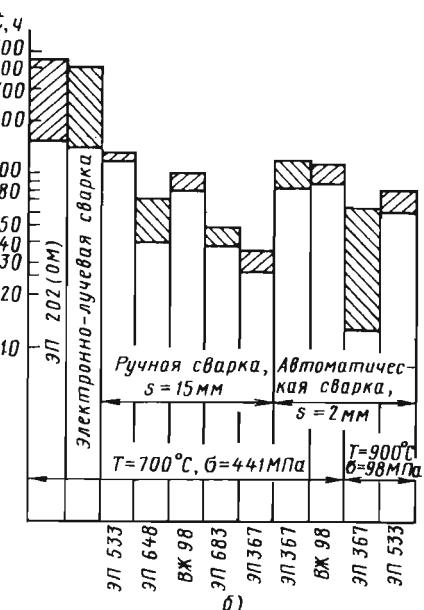


Рис. 10.32. Кратковременная прочность сварных соединений сплава ЭП 202 (ХН67ВМТЮ) при температурах  $700$  и  $850^{\circ}\text{C}$ , полученных дуговыми и лучевыми способами сварки с применением присадочных материалов различного состава после закалки при  $1200$  и старения при  $850^{\circ}\text{C}$  в течение  $15$  ч (а); длительная прочность тех же сварных соединений при температурах  $700$  и  $900^{\circ}\text{C}$  (б)



## 10.6. СВАРКА ЧУГУНА

### 10.6.1. ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ

Чугун представляет собой многокомпонентный сплав железа с углеродом, содержащий  $>2,1\%$  С. Кроме углерода в чугуне обычно содержится (в %): до 4 Si; 2 Mn; 0,3 P; 0,25 S, а также 0,1 Cr, Ni или Cu.

В зависимости от состояния углерода в сплаве различают белые, серые, ковкие и высокопрочные чугуны.

В белом чугуне весь углерод находится в виде химического соединения с железом – цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Цементит обладает высокими твердостью (800 НВ) и хрупкостью, поэтому трудно поддается механической обработке. Из-за этого белые чугуны нашли ограниченное применение в качестве конструкционных материалов и служат в основном для получения ковких чугунов. При длительном обжиге белого чугуна цементит в нем распадается и углерод выделяется в свободное состояние.

Серые чугуны в изломе имеют серебристый цвет из-за наличия в них пластинчатых включений графита. Они широко используются в литейном производстве и выпускаются в соответствии с ГОСТ 1412–85. Прочность серого чугуна с пластинчатым графитом при растяжении находится в пределах 120...440 МПа, твердость 140...290 НВ. Структура серых чугунов в зависимости от состава и условий охлаждения может быть с перлитной, перлитно-ферритной и ферритной основой.

Наличие свободного графита в чугуне (до 50 % С) оказывает влияние на его свойства. Увеличение количества и размеров графитовых включений и неравномерность их распределения уменьшают прочность чугуна. Вместе с тем, свободный графит придает чугуну износостойкость, высокие литейные свойства, хорошую обрабатываемость режущим инструментом и высокую сопротивляемость при знакопеременных нагрузках. Все это обуславливает широкое применение серого чугуна в качестве конструкционного материала.

Чугун, полученный из белого чугуна продолжительным отжигом при температуре 800...850 °С, называют ковким. В отличие от серого чугуна в ковком углерод находится не в виде пластинчатого графита, а в виде хлопьевидного. Ковкий чугун по сравнению с серым чугуном обладает более высокой прочностью (300...630 МПа), пластичностью и ударной

вязкостью. Ковкий чугун имеет однородные свойства по сечению, в его отливках отсутствуют напряжения, ему присущи высокие механические свойства, он хорошо обрабатывается.

В зависимости от режима термообработки основа ковкого чугуна может быть ферритной или перлитной. Состав основных элементов в ковком чугуне (в %): 2,3...3 С; 0,9...16 Si; 0,3...1,2 Mn; >0,15 P и S. Основные характеристики ковких чугунов определены ГОСТ 1215–79. Ферритные чугуны отличаются более высокой пластичностью, а перлитные обеспечивают лучшую износостойкость.

В промышленности получили распространение высокопрочные и легированные чугуны. В высокопрочном чугуне (ГОСТ 7293–85) углерод находится в виде шаровидного графита. Содержание основных элементов в таких чугунах составляет (в %): до 38 С; 2,9 Si; 0,9 Mn; 0,1 Cr; 0,02 S; 0,1 P; 0,08 Mg. Чугуны с шаровидным графитом значительно превосходят по характеристикам серые чугуны, в частности по износостойкости, жаро- и коррозионной стойкости.

Легированные чугуны выпускаются согласно ГОСТ 7769–82. Они подразделяются на жаростойкие хромовые чугуны, а также коррозионно-, износостойкие и др. Такие чугуны легируются хромом, никелем, кремнием, магнием, медью и другими элементами. В легированных чугунах с содержанием до 10 % Ni, Cr и Mn и более имеют место перлитно-карбидные, бейнитные, мартенситные и аустенитные основы.

### 10.6.2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЧУГУНА

Высокое содержание углерода, кремния, серы и фосфора в чугуне относят его к трудно свариваемым сплавам. Основным фактором, затрудняющим сварку чугуна, является возникновение трещин в процессе сварки и охлаждения после сварки из-за образования хрупкого легкоплавкого сплава Fe – FeS, располагающегося по границам металлических зерен железа. Этот сплав при высоких температурах подвергается значительным объемным изменениям, что приводит к большим внутренним напряжениям и трещинам в ОШЗ.

При сварке чугуна выгорает кремний, что вызывает появление отбеленных зон с высокой твердостью, склонных к образованию трещин. Образующиеся при этом оксиды кремния имеют температуру плавления выше, чем свариваемый металл, и препятствуют сварке.

Особенно склонны к трещинообразованию серые чугуны с крупными многочисленными графитовыми выделениями в виде пластинок, что несвойственно мелкозернистым перлитным чугунам с мелкими графитовыми включениями, а также ковким чугунам вследствие благоприятной формы графита и большой его разобщенности.

Сварка чугуна сопровождается выделением газов из сварочной ванны, что приводит к образованию пор в наплавленном металле. Водород, азот, водяной пар и оксид углерода могут поступать в ванну из окружающего атмосферного воздуха, присадочных материалов или образуются в результате реакций в жидком металле, например при выгорании углерода. Важнейшими причинами возникновения пор являются повышенная растворимость газов в жидком металле и ее резкое падение при остывании металла, в особенности при его кристаллизации.

Чугунные конструкции имеют неоднородный химический состав и структуру по сечению вследствие неоднородной скорости охлаждения тонких и толстых участков отливок. В зависимости от скорости охлаждения на отдельных тонких участках происходит отбеливание чугуна, а на других (толстых) сохраняется структура серого чугуна. Отбеленный чугун с крупной структурой сваривается хуже, чем чугун с мелкой структурой.

#### 10.6.3. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ЧУГУНА

Чугун подвергается сварке при:

- устранении дефектов в отливках;
- ремонте деталей, вышедших из строя в процессе эксплуатации;
- изготовлении сварно-литых конструкций.

Чугун можно сваривать газовой сваркой; ручной и механизированной дуговой сваркой; электрошлаковой и термитной сваркой; заливкой жидким чугуном и др. Выбор метода сварки зависит от требований, предъявляемых к сварному соединению, и от производственных возможностей. При выборе метода сварки учитывают: необходимость в механической обработке металла шва и ОШЗ; необходимость получения однородного металла шва; требования к плотности сварного шва; характер нагрузки, при котором должны работать свариваемые детали.

Различают холодную и горячую сварку чугуна. Холодная сварка выполняется без по-

догрева свариваемых деталей, горячая – при полном подогреве деталей до температуры 600...700 °C.

Горячая сварка осуществляется в следующей очередности: механическая обработка под сварку, формовка свариваемых деталей, нагрев, сварка и охлаждение сваренных деталей.

Механическая обработка заключается в вырубке дефектных участков, зачистке их от масла. Для предотвращения распространения трещин концы их перед сваркой рекомендуется засверливать.

Предварительный нагрев деталей осуществляется в горнах или переносными горелками.

#### 10.6.4. ГАЗОВАЯ СВАРКА ЧУГУНА

Газовая сварка чугуна широко применяется для устранения дефектов литья при ремонтных работах на чугунных деталях. Газовое пламя позволяет регулировать тепловые потоки в свариваемое изделие и присадочный металл и обеспечивает требуемые термические циклы сварки чугуна. Крупные дефекты можно устранять, применяя одновременно несколько сварочных горелок.

Для сварки чугуна служат обычные сегментно выпускаемые сварочные горелки, работающие на ацетиленовом пламени или на пропан-бутановом. Учитывая большие объемы наплавленного металла, для сварки чугуна рекомендуются горелки «Факел», «Норд» и другие с наконечниками № 3 – 5. Для сварки на газах-заменителях применяются горелки типа ГЗУ-3, ГЗУ-5.

При газовой сварке чугуна используются чугунные прутки марок А и Б (ТУ 2-043-1193-87) (табл. 10.61), в которых повышенное содержание кремния обеспечивает графитизацию углерода, устраняет отбеливание чугуна, придает наплавленному металлу ферритную структуру. Для получения более плотных перлитных структур наплавленного металла используют присадочные прутки из низколегированного чугуна (табл. 10.62).

При газовой сварке чугуна необходимо применять флюсы, которые защищают кромки металла от окисления, из жидкого металла извлекают оксиды и неметаллические включения. Основным компонентом флюсов для сварки чугуна является бура ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Иногда к ней добавляют (в %): до 25...50 углекислого натрия, 25 углекислого калия, до 50 натриевой селитры. Порошковые флюсы применять при сварке не всегда удобно.

### 10.61. Состав чугунных присадочных прутков для сварки

Марка прутка	Массовая доля, %					Применение	
	углерода	кремния	серы	фосфора	марганца	хрома	никеля
A	3,0...3,5	3,0...3,4	0,08	0,2...0,4	0,5...0,8	0,05	0,3
B		3,5...4,0		0,3...0,5			

### 10.62. Состав низколегированных чугунных присадочных прутков для сварки

Марка прутка	Массовая доля, %							
	углерода	кремния	марганца	серы	фосфора	хрома		
				не более	не более	не более		
I	3,3...3,5	3,4...3,7	0,5...0,7	0,04	0,15	0,10		
II			0,5...3,7					
Марка прутка	Массовая доля, %							
	никеля		титана	меди	олова			
	0,1	0,10	—	—	0,3...0,5			
I	0,60				2,0...2,5	—		
II								

Для устранения отбеливания наплавленного металла сварку чугуна чугунными присадочными материалами рекомендуется выполнять с предварительным подогревом изделия до 600...650 °C и последующим охлаждением его со скоростью ≤100 °C/ч. В этом случае гарантируется отсутствие цементита и мартенсита в структуре наплавленного металла и в ЗТВ и обеспечивается равномерность металла сварного шва и основного металла.

Горячая газовая сварка применяется для устранения сквозных трещин в малогабаритных отливках, раковинах, вскипах, пористости в жестком контуре (середине направляющих, в ребрах жесткости, середине плоскости и т.д.) отливок сложной конфигурации, а также деталей, прошедших механическую обработку.

Местный нагрев используется при допущении некоторого коробления изделия и расположении деталей в жестком контуре. Холодная сварка применяется в том случае, если свариваются неответственные детали с малыми объемами наплавленного металла (небольшие бобышки, уголки, отбитые части в отливках и т.д.). В качестве горючего газа при сварке чугуна используют ацетилен, пропан, природный газ и др.

Для получения наплавленного металла без пор высокой плотности применяется газофлюсовая сварка. Газообразный флюс, пода-

ваемый в момент подогрева и разделки дефекта свариваемого изделия, улучшает процесс сварки, при этом достигается равномерный шлаковый покров с большим поверхностным натяжением, чем при использовании порошковых флюсов, что обеспечивает образование ровного валика без натеков. Прочность металла шва при горячей газовой и газофлюсовой сварке не устраивает прочность основного металла (250...280 МПа), и твердость его (170...220 НВ) обеспечивает хорошую обрабатываемость детали.

Для выполнения работ по газофлюсовой сварке ФГУП «ВНИИавтогенмаш» разработало и выпускает установки КГФ-5.

Для устранения дефектов, выявленных в процессе окончательной механической обработки отливок, применяют низкотемпературную пайко-сварку чугуна, осуществляющую с частичным поверхностным расплавлением основного металла.

Пайко-сварка чугуна может выполняться с чугунными присадочными материалами, латунными припоями и газопорошковой наплавкой. Таким образом устраняются различные раковины, вскипы, усадочные поры и мелкие сквозные трещины.

В процессе низкотемпературной пайко-сварки жидкую ванну не образуется. Капля жидкого припоя под действием флюса и давле-

ния газового пламени растекается тонким слоем по основному металлу. Часть жидкого припоя под действием капиллярных сил заполняет пустоты, образующиеся в чугуне. Смачивание присадочного металла с чугуном обеспечивается за счет активных добавок, вводимых во флюс, которые взаимодействуют с углеродом, разрыхляют его, что, в свою очередь, снижает межфазную поверхностную энергию и улучшает условия смачивания. Заклинивание наплавленного металла в капиллярах основного металла, а также взаимная диффузия атомов на границе сплавления и обуславливает прочное паяно-сварное соединение.

Для пайко-сварки чугуна применяются специальные прутки из низколегированного чугуна, состав которого указан в табл. 10.63, и специальные флюсы (табл. 10.64).

Для всех процессов пайко-сварки и пайки используются сварочные горелки, работающие на ацетиленокислородной смеси; последняя обеспечивает концентрированный источник теплоты в требуемом направлении.

Пайко-сварка чугуна латунными припоями хорошо зарекомендовала себя при ремонтной сварке, когда разные цвета и твердость основного и наплавленного металла не являются браковочным признаком. Главное преимущество пайко-сварки чугуна латунью заключается в том, что его нагрев до температуры плавления латуни ( $900^{\circ}\text{C}$ ) существенно не изменяет структуру металла и не вызывает термических напряжений.

### 10.63. Состав присадочных чугунных прутков для низкотемпературной пайко-сварки

Марка прутка	Массовая доля, %							
	углерода	кремния	марганца	фосфора	никеля	титана	меди	серы
НЧ-2	3,0...3,5	3,5...4,0						
УНЧ-2	3,4...3,7	3,5...3,8	0,6...0,7	0,2...0,4	0,4...0,6	0,15...0,2	0,1	$\leq 0,05$

### 10.64. Флюсы для пайко-сварки чугунными прутками

Марка флюса	Массовая доля, %	Марка флюса	Массовая доля, %
ФСЧ-2	50 азотно-кислого натрия, 26,5 углекислого натрия, 23 обезвоженной буры, 0,5 углекислого натрия	МАФ-1	33 плавленой буры, 12 кальцинированной соды, 27 натриевой селитры, 7 оксида кобальта, 12,5 фтористого натрия, 8,5 фтористого калия

В качестве припоеv используют латунь Л63 или ЛОК 59-1-03 (ГОСТ 16130-90; см. табл. 9.45). Этот припой позволяет получить более плотный паяно-сварной шов и обеспечивает бездымяный процесс. При пайко-сварке чугуна латунными припоями используются флюсы следующего состава (в %): 100 буры; по 50 буры и борной кислоты, а также специальные флюсы (см. табл. 9.46).

Газопорошковой наплавкой устраниют мелкие дефекты чугунных отливок, обнаруженные после механической обработки. Поверхность, подлежащую наплавке, нагревают пламенем горелки до  $300\ldots 400^{\circ}\text{C}$ . При наплавке вначале напыляется на дефектную поверхность слой порошка, который затем оплавляется.

Напыляется новый слой, который также оплавляется. В результате диффузионных процессов между расплавленным порошкообразным сплавом и поверхностными слоями основного металла образуется неразъемное соединение. Основной металл при этом не претерпевает структурных изменений, что обеспечивает заданные геометрические размеры деталей. Газопорошковой наплавкой получают на исправляемых поверхностях слой металла толщиной до 3 мм без расплавления основного металла, обеспечивают ускоренный и равномерный нагрев порошковых сплавов в пламени горелки без перегрева основного металла, а также возможность ведения процесса в любом пространственном положении.

### 10.65. Состав порошкообразных сплавов для газопорошковой наплавки

Марка сплава	Массовая доля, %		
	меди	бора	кремния
НПЧ-1	5,0...7,0	1,0...1,8	0,7...0,95
НПЧ-2		1,7...2,3	1,0...2,5

Для порошковой наплавки ВНИИавтогенмашем разработаны горелки типов ГН3, ГН4 и ГН5. Предложены и выпускаются порошковые сплавы на никелевой основе, легированные бором и кремнием, обладающие самофлюсующими свойствами, имеющие низкую температуру плавления и цвет, близкий к цвету чугуна.

В табл. 10.65 приведен состав порошкообразных сплавов на никелевой основе для наплавки на чугун.

#### 10.6.5. ДУГОВАЯ СВАРКА ЧУГУНА

**Холодная сварка.** Холодная сварка серого и ковкого чугунов выполняется электродами нескольких разновидностей: стальными со специальными покрытиями; чугунными; медными; электродами из никелевого аустенитного чугуна и др.

Стальные электроды на базе проволоки Св-08 применяют для декоративной заварки поверхностных дефектов с целью восстановления товарного вида отливок. Лучшими характеристиками обладают электроды типа ЦЧ-4 с проволокой, легированной ванадием, который при сварке связывает углерод в мелкие карбиды, равномерно распределенные в низкоуглеродистой матрице. Прочность металла шва этих углеродов превосходит прочность серого чугуна. Электроды ЦЧ-4 используют для заварки дефектов обрабатываемых нерабочих поверхностей, при ремонте неответственных чугунных изделий небольших размеров с малыми объемами наплавления, не требующих после сварки механической обработки.

Для сварки чугуна можно применять электроды УОНИ-13/45. Сварка такими электродами выполняется на постоянном токе обратной полярности.

Для холодной сварки чугуна служат медные электроды. Ими сваривают малогабаритные изделия с небольшими дефектами, работающие при незначительных статических на-

грузках и требующих плотных швов. Медь не образует карбидов и не растворяет углерод и железо. Электроды из 80 % Cu и 20 % Fe дают достаточно прочное сварное соединение, которое хорошо обрабатывается.

К медным электродам относятся марки ОЗЧ-2 и ОЗЧ-6. Последние имеют основное покрытие из железного порошка. Стержень электрода изготавливают из проволоки М1 по ГОСТ 859-78 или МТ по ТУ 16.К71-087-90. Указанные электроды предназначены для дуговой сварки без подогрева изделий из серого и ковкого чугунов при ремонте тонкостенных конструкций.

Покрытые электроды ОЗЧ-2 включают ферромарганец, карбид кремния, мрамор, плавиковый шпат, маршалит. Хорошие результаты при сварке чугуна дают электроды сплавов никеля. Сплавы на основе никеля, используемые для сварки чугуна, делятся на три группы: чистый никель, сплав никеля с железом (30...50 % Fe) и сплав никеля с медью (20...30 % Cu). К этому классу электродов относятся электроды ОЗЧ-3, ОЗЧ-4, никелемедные – МНЧ-2 и никележелезные – ОЗЧН-1.

Сварка чугуна без подогрева может выполняться присадочными материалами в виде сплавов чугуна на никелевой основе с >20 % Ni. При сварке таким сплавом в сварном шве образуется никелевый аустенит, растворяющий большое количество углерода без образования карбидов. Сварной шов отличается высокой пластичностью и малой твердостью.

Примерный состав никелевого чугуна (в %): 2,5 C, 2,5 Si, 0,6 Mn, 20 Ni, 5 Cu, 0,06 S, 0,2 P.

Покрытые электроды состоят из 70 % карборунда и 30 % углекислого бария или стронция, разведенных на жидким стекле.

Сваркой электродами из никелевого аустенитного чугуна исправляют дефекты в отливках, где механическая обработка наплавленного металла затруднительна, а сварное соединение должно иметь высокую прочность. Сварку выполняют как на переменном, так и на постоянном токе.

Для холодной сварки, наплавки и заварки дефектов литья в деталях из серых и высокопрочных чугунов применяют электроды ОЗЖН-1. Стержень электрода выполнен из проволоки Св-08Н50 по ГОСТ 2246-70. Состав наплавленного металла включает: 48 % Ni, по 2 % Si и Mn, остальное – железо.

Для сварки указанных материалов с повышенными требованиями по чистоте обрабатываемой поверхности при наличии ударных нагрузок используют электроды ОЗЧ-3, МОЗЧ-4. Стержень электрода – никелевая проволока марки НП-2 по ГОСТ 2179–75 и 492–73.

Для сварки изделий из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, серого чугуна с пластинчатым графитом, а также для получения разнородных соединений чугуна со сталью ЦНИИТмашем разработаны электроды марки ЦЧ-4А. В состав стержня электролов входят (в %): 0,2 C, 0,8 Mn, 14 Si, 8...11 V,

≤0,04 S и P, остальное – железо. В состав покрытия электролов включены сильные карбидообразующие элементы (ванадий, ниобий, титан), с помощью которых удается связывать полностью весь углерод и получить структуру шва с ферритной матрицей и распределенными мелкодисперсными карбидами.

При сварке электродами ЦЧ-4 рекомендуется местный подогрев до температуры 300 °C.

Химический состав наплавленного металла различных электролов и механические свойства металла шва приведены в табл. 10.66 и 10.67.

#### 10.66. Химический состав наплавленного металла различных электролов (в %)

	C	Si	Mn	V	S	P	Fe
ЦЧ-4	0,13	0,5	0,9	8,6	0,014	0,023	Основа
ОЗЧ-2	Ni		Cu		Mn		Si
	2		Основа		1,8		0,2
МНЧ-2	Ni		Cu		Mn		Fe
	66		Основа		2,2		2,9
ОЗЧ-6	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	B
	0,05	0,3	1,1	1,2	0,7	10	0,2
ОЗЖН-1	C	Si	Mn	Ni	Fe	S	P
	0,1	0,6	0,4	48	Основа	≤0,03	Следы
ОЗЧ-3	C	Si	Mn	Ni	Cu	Fe	S
	≤0,04	≤0,14	≤0,1	≥99,0	≤0,06	≤0,1	≤0,005
ОЗЧ-4	C	Si	Mn	Ni	Cu	Fe	S
	0,3		0,5	95		1,5	0,005
P							

#### 10.67. Механические свойства металла шва, выполненного различными электроловами

Марка электрода	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость наплавленного металла, НВ
ЦЧ-4	495	–	8	160...190
ОЗЧ-2	250	–	–	150...200
МНЧ-2	–	–	–	150
ОЗЧ-6	320	198	14	160
ОЗЖН-1	510	340	26	200
ОЗЧ-3	538	–	24,4	160
ОЗЧ-4	523	–	17	170

### 10.68. Рекомендуемые режимы сварки

Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	
	Нижнее положение	Вертикальное положение
3,0	90...110	80...100
4,0	120...140	100...120
5,0	160...190	150...170
6,0	220...250	210...240

**Дуговая сварка с подогревом.** Она применяется для устранения дефектов в конструкциях из ковких чугунов, чугунов с шаровидным графитом или других специальных чугунов. Электроды для сварки должны изготавливаться из стержней, однородных основному металлу. Для получения наплавленного металла ферритно-перлитной структуры применяют электроды ЭЧ-1, изготовленные из прутков ПЧ-1. Перлитную структуру получают электродами ЭЧ-2, выполненными из стержней ПЧС-1. Электроды марки ЭВЧ-1 из прутков ПЧС-2 позволяют получать высокопрочный наплавленный металл с шаровидным графитом.

Наплавленный металл в виде перлитно-ферритной структуры достигается сваркой электродами ЦЧ-5, изготовленными на базе стальной проволоки Св-08, температура подогрева в зависимости от марки чугуна и объемов свариваемой детали 300...700 °C с последующим охлаждением на 100 %.

Дуговую сварку чугуна выполняют на постоянном токе обратной полярности (табл. 10.68).

Сварку проводят небольшими участками длиной 30...60 мм с послойным охлаждением на воздухе до 60 °C. Сразу после сварки шов подвергается проковке легкими ударами молотка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновская Г.А., Журавицкий Ю.И. Газовая сварка чугуна. М.: Машиностроение, 1974. 118 с.
2. Вишняков Я.Д. Дефекты упаковки в кристаллической структуре. М.: Металлургия, 1970. 216 с.
3. Гречкий Ю.Я., Метлицкий В.А. Сварка в машиностроении. М., 1978.

4. Горячие трещины при сварке жаропрочных сталей / М.Х. Шоршоров, Т.А. Чернышова, А.А. Ерохин и др. М.: Машиностроение, 1973. 224 с.

5. Земзин В.А. Жаропрочность сварных соединений. Л.: Машиностроение, 1972. 272 с.

6. Земзин В.Н., Шрон Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. М.: Машиностроение, 1978. 367 с.

7. Зимина Л.Н. Свариваемые жаропрочные никелевые сплавы и принципы их легирования // МиТОМ. 1977. № 11. С. 19 – 22.

8. Казеннов Ю.И., Ревизников Л.И. Влияние примесных и легирующих элементов на свариваемость стали со стабильно аустенитной структурой // Сварочное производство. 1978. № 11. С. 29 – 31.

9. Квасницкий В.Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. Л.: Судостроение, 1986. 224 с.

10. Каходский Н.А. Сварка высоколегированных сталей. Киев: Техника, 1975. 200 с.

11. Ланская К.А. Жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1969. 247 с.

12. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.

13. Медовар Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1966. 429 с.

14. Отраслевой стандарт «Сосуды и аппараты стальные сварные». Общие технические условия. ОСТ 26 291–94. М.: НПО ОБТ, 1996.

15. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращений аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста. М.: Металлургия, 1991. 502 с.

16. Потапов Н.Н., Баранов Д.Н., Кавоккин О.С. и др. Сварочные материалы для дуговой сварки. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. Н.Н. Потапова. М.: Машиностроение, 1993. 768 с.

17. Правила и нормы в атомной энергетике. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-008-89. М.: Атомэнергоиздат, 1990.

18. Правила и нормы в атомной энергетике. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПНАЭ Г-7-009-89.

- Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПНАЭ Г-7-010-89. М.: Атомэнергоиздат, 1991.
19. **Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов / Госгортехнадзор России.** М.: ПИО ОБТ, 2000.
20. **Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды / Госгортехнадзор России.** М.: ПИО ОБТ, 1997.
21. **Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением / Госгортехнадзор России.** М.: ПИО ОБТ, 1999.
22. **Сварка и свариваемые материалы: Справочник.** В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 527 с.
23. **Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие.** В 2-х т. / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы. М.: Машиностроение, 1989. 543 с.
24. **Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие.** В 2-х т. / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. Т. 2. Сварочные проволоки и электроды. М: Машиностроение, 1993. 763 с.
25. **Сварочные материалы: Каталог.** М.: АО «Спецэлектрод», 2002. 210 с.
26. **Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования.** РД 153-34.1.-003-01. Минэнерго России. М.: ПИО ОБТ, 2001. 399 с.
27. **Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаро прочные. Марки и технические требования.** ГОСТ 5632-72.
28. **Химушин Ф.Ф.** Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969. 752 с.
29. **Юрченко Ю.Ф., Агапов Г.И.** Коррозия сварных соединений в кислых средах. М: Машиностроение, 1976. 150 с.
30. **Энциклопедия «Машиностроение».** Т. 2-II. Стали. Чугуны. М.: Машиностроение, 2000. 409 с.
31. **Welding Information for the Sandvik Duplex Family.** S-1252-ENG. 1995. Sandvik Steel, S. 811 81, Sandviken, Sweden.

## Г л а в а 11

# ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 11.1. ЛЕГКИЕ И ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ: АЛЮМИНИЙ, МАГНИЙ И ИХ СПЛАВЫ

**Основные марки сплавов и их свойства.** Все алюминиевые и магниевые сплавы разделяются на две большие группы: деформируемые и литейные. Среди деформируемых алюминиевых сплавов следует выделить сплавы, которые по своему назначению относятся к ковочным сплавам. Деформируемые алюминиевые и магниевые сплавы, в свою очередь, подразделяются на неупрочняемые сплавы и сплавы, упрочняемые термической обработкой (табл. 11.1). Большинство литейных сплавов относится к группе сплавов, упрочняемых термической обработкой. Механические свойства различных полуфабрикатов представлены в табл. 11.2.

**Свариваемость алюминиевых и магниевых сплавов.** Свариваемость – это совокупность определенных свойств материала, позволяющих при рациональном технологическом процессе получать высококачественные сварные соединения. Часто свариваемость оценивается сопоставлением свойств сварных соединений с аналогичными свойствами основного металла. Принято рассматривать склонность материала к образованию дефектов при сварке (трещин, пор, оксидных плен и других дефектов), свойства при статических, повторно статических, высокочастотных и ударных нагрузках, коррозионную стойкость с учетом условий эксплуатации изделий.

В табл. 11.1 приведена оценка свариваемости сплавов при сварке их плавлением (дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов) и контактной сварке (точечная и шовная). Марка сварочной проволоки при сварке, прихватке и подварке сплавов выбирается в соответствии с рекомендациями, представленными в табл. 11.1.

**Дефекты в сварном соединении.** При дуговой сварке алюминиевых сплавов в среде

инертных газов встречаются различные дефекты: пористость (~48 %), оксидные плены (~32 %), вольфрамовые включения (~12 %), трещины, несплавления, смещение кромок и др.

Кристаллизационные (горячие) трещины, оксидные плены, непровар, несплавление, обнаруженные в сварном соединении, подлежат обязательному устранению. Что касается пор, вольфрамовых включений, раковин и других дефектов, то они допускаются без исправления конструкции в определенных количестве и объеме. Дефекты, выходящие по размерам и количеству из нормы (табл. 11.3 и 11.4), подлежат исправлению подваркой. Суммарная длина дефектных участков, подлежащих подварке, не должна превышать 20 % длины шва (но ≤300 мм) для сварных соединений I категории и 30 % (но ≤400 мм) для соединений II категории. Длина единичного дефектного участка не должна превышать 60 мм при расстоянии между ними ≥100 (I категория) и 80 мм (II категория).

**Сопротивляемость ГТ.** При сварке сплавов Al – Mg, Al – Cu, Al – Zn и Al – Si установлена повышенная склонность к трещинообразованию на сплавах с максимальным эффективным интервалом кристаллизации. Металлургические способы уменьшения склонности к трещинам заключаются во введении в основной металл и сварочную проволоку отдельных химических элементов, которые, изменяя эффективный интервал кристаллизации и пластичность металла в твердожидком состоянии, не только влияют на величину горячеломкости металла при сварке, но и позволяют за счет смещения неравновесного солидуса по отношению к равновесному перенести трещину из опасной зоны (зоны сплавления) в наплавленный металл.

Технологические мероприятия по предотвращению трещин в сварном соединении находятся во взаимосвязи с темпом деформации в температурном интервале хрупкости, а также с наличием концентратора напряжений.

**11.1. Марки, химический состав и свариваемость алюминиевых и магниевых деформируемых сплавов**

Система	Марка сплава	Массовая доля, %	Свариваемость (сварка плавлением)			Рекомендуемые марки сварочной проволоки	Горячеломкость				
			без присадки	с присадкой, гр. А	с присадкой, гр. Б		Крестовая проба $K$ , %	Проба MBTU $A_{kp}$ , мм/мин			
<i>Алюминиевые сплавы</i>											
<i>А. Термически неупрочняемые</i>											
Al	АД	99,3 Al	Св.	Cв.	Cв. A97; св. A85	5,0	9,0				
Al - Mn	АМц	1,3 Mn		-	Св. АМц	0,7	7,0				
Al - Mg	АМг1	1,1 Mg	Нс.	Св.	Св. АМг1	12,0	6,0				
	АМг2	2,2 Mg; 0,4 Mn			Св. АМг2						
	АМг3	3,6 Mg; 0,6 Si; 0,5 Mn	Св.	-	Св. АМг3	8,0	8,0				
	АМг4	4,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti		Св.	Св. АМг4	10	7,0				
	АМг5	5,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti			Св. АМг5						
	АМг6	6,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti			Св. АМг6	8,0	8,0				
<i>Б. Термически упрочняемые</i>											
Al - Cu	Д20	6,5 Cu; 0,6 Mn; 0,15 Ti	Св.	-	Д20	15	6,0				
	1201	6,3 Cu; 0,3 Mn; 0,06 Ti; 0,17 Zr; 0,1 V				5,0	10				
Al - Mg - Si	1205	6,3 Cu; 0,6 Mn; 0,06 Ti; 0,11 Zr; 0,15 Cd	Нс.	Св.	Св. 1201	12					
	АД31	0,6 Mg; 0,5 Si				15	6,0				
	АД33	1,1 Mg; 0,2 Cu; 0,6 Si; 0,25 Cr				12					
	АД35	1,1 Mg; 1,0 Si; 0,7 Mn; 0,25 Cr			Св. АК5						
	AB	0,7 Mg; 0,3 Cu; 0,85 Si; 0,25 Mn				10	7,0				

Продолжение табл. 11.1

Система	Марка сплава	Массовая доля, %	Свариваемость (сварка плавлением)			Рекомендуемые марки сварочной проволоки	Горячеломкость		
			без присадки	с присадкой, гр. А	с присадкой, гр. Б		Крестовая проба К, %	Проба МВТУ $A_{fr}$ , мм/мин	
Al - Zn - Mg	B92ц	4,4 Mg; 3,2 Zn; 0,8 Mn; 0,13 Zr; 0,14 Cr	Св.		Hс.	Св. В92ц	12	6,0	
	1915	1,1 Mg; 3,7 Zn; 0,4 Mn; 0,18 Zr	Hс.		Св.	Св. 1557	10	7,0	
Al - Mg - Cu	ВАД1	2,5 Mg; 4,1 Cu; 0,6 Mn; 0,06 Ti; 0,15 Zr	Св.		Hс.	ВАД1			
	Д1	0,6 Mg; 4,3 Cu; 0,6 Mn	Св.			Д1	40	2,0	
	Д16	1,5 Mg; 4,3 Cu; 0,6 Mn				Д16	50	1,0	
	Д19	2,0 Mg; 4,0 Cu; 0,75 Mn				Д19	45	2,0	
Al - Mg - Cu - Zn	B95	2,3 Mg; 1,7 Cu; 6,0 Zn; 0,4 Mn; 0,18 Cr	Hс.		Hс.	B95	50	1,0	
	B96	2,6 Mg; 2,3 Cu; 8,5 Zn				B96	60		
Al - Mg - Si - Cu	AK6	0,6 Mg; 2,2 Cu; 0,9 Si; 0,6 Mn				AK6	45	-	
	AK8	0,6 Mg; 4,3 Cu; 0,9 Si; 0,7 Mn				AK8	50		
Al - Mg - Cu - Fe - Si	AK4	1,6 Mg; 2,2 Cu; 1,2 Fe; 1,3 Ni	AK4			60	65	-	
	AK4-I	1,6 Mg; 2,2 Cu; 1,2 Fe; 1,2 Ni				65			

Окончание табл. 11.1

Система	Марка сплава	Массовая доля, %	Свариваемость (сварка плавлением)			Рекомендуемые марки сварочной проволоки	Горячеломкость				
			без присадки	с присадкой, гр. А	с присадкой, гр. Б		Крестовая проба $K, \%$	Проба MBTV $A_{cr}, \text{мм}/\text{мин}$			
<i>Магниевые сплавы</i>											
<i>А. Термически неупрочняемые</i>											
Mg – Mn	MA1	1,9 Mn	Св.	Нс.	MA1	10	-	-			
	MA8	1,9 Mn; 0,25 Ce			MA2-1	20					
Mg – Zn	MA20 (ВМД8)	1,25 Zn; 0,2 Ce; 0,09 Zr	Нс.	Св.	MA20-1	10	-	-			
Mg – Al – Zn	MA2	3,5 Al; 0,5 Zn; 0,3 Mn			MA2-1	15					
	MA2-1	4,4 Al; 1,1 Zn; 0,4 Mn	Св.	Нс.		20	-	-			
Mg – Zn – Cd – La	MA15 (ВМД3)	1,6 Cd; 3,0 Zn; 0,9 La; 0,7 Zr		MA15	30						
Mg – Zn – Cd – Nd	MA19 (ВМД6)	0,6 Cd; 6,2 Zn; 1,7 Nd; 0,7 Zr	Нс.	Св.	MA19	>30	-	-			
<i>Б. Термически упрочняемые</i>											
Mg – Zn	MA14 (ВМ65-1)	5,5 Zn; 0,6 Zr	Нс.	Св.	MA14	>40	-	-			
Mg – Nd	MA12	3,0 Nd; 0,6 Zr			MA12	15					
Mg – Al – Zn	MA5	8,5 Al; 0,5 Zn; 0,3 Mn	Нс.	Св.	MA5	20	-	-			
Mg – Mn – Nd	MA11	3,0 Nd; 2,0 Mn; 0,2 Ni			MA11	>40					

Примечания. 1. Св. – сплав свариваемый; Нс. – сплав трудносвариваемый.

2. Гр. А – проволока химического состава основного металла; гр. Б – проволока химического состава неидентична с химическим составом основного металла.

3. При контактной сварке (точечной, шовной) все сплавы относятся к сплавам свариваемым (св.).

**11.2. Механические свойства полуфабрикатов алюминиевых и магниевых сплавов**

Сплав	Состояние	Лист $s = 2$ мм			Лист $s = 10$ мм			Плита $s = 20$ мм			Профиль			Поковка $m = 80\dots100$ кг		
		$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$
<i>Алюминиевые сплавы</i>																
АД0	М	80	3,5	35	80	3,5	35	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АД1	Н	150	100	6	150	100	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АМц	М	120	60	40	110	60	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	П	170	130	25	170	130	25	150	120	22	—	—	—	—	—	—
АМг1	М	120	65	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Н	200	180	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АМг2	М	190	80	25	170	—	16	180	—	7	—	—	—	150	130	—
	Н	270	220	4	220	—	15	—	—	230	—	—	12	—	—	—
АМг3	М	220	100	25	190	80	15	190	—	15	180	80	12	170	—	12
	П	250	200	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АМг4	М	280	140	20	260	120	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Н	340	160	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АМг5	М	300	150	20	280	130	15	—	—	—	—	—	—	300	150	15
	Н	—	—	—	340	160	14	320	170	23	270	120	15	—	—	—
АМг6	М	340	170	20	320	160	15	—	—	—	345	170	20	340	180	21
	Н	400	300	9	—	—	—	400	310	7	355	190	19	—	—	—
Д20	T1	400	300	10	380	280	8	380	280	8	350	240	8	400	320	12
1201	T1	430	320	60	400	300	10	450	350	7	420	350	8	380	370	10
	T1Н	450	350	55	420	340	6	460	350	5	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 11.2

Сплав	Состоя- ние	Лист $s = 2$ мм			Лист $s = 10$ мм			Плита $s = 20$ мм			Профиль			Поковка $m = 80\dots100$ кг		
		$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$
I205	T1	440	350	9	420	330	7	420	320	7	465	370	8	445	365	7
Д21	T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	430	350	9
АД31	T	170	80	22	170	80	22	-	-	-	140	70	13	-	-	-
	T1	240	190	11	240	190	11	235	200	13	255	227	12	240	200	11
АД33	T	250	110	19	250	110	19	-	-	-	180	110	15	-	-	-
	T1	310	260	14	310	260	14	290	270	10	290	260	12	270	20	8
АД35	T	240	140	18	240	140	18	270	200	13	270	200	13	-	-	-
	T1	320	250	12	320	250	12	330	300	10	330	300	10	330	300	10
AB	T	250	160	23	250	160	23	-	-	-	180	-	14	-	-	-
	T1	320	270	13	320	270	13	330	290	13	335	295	12	300	260	10
B92ц	T	400	250	15	400	250	15	420	280	12	440	320	10	420	280	10
	T1	420	300	12	420	300	12	-	-	-	470	360	8	430	300	8
1915	T	350	220	17	350	220	17	-	-	-	370	250	11	350	220	14
	T1	380	300	10	380	300	10	420	260	14	400	320	10	370	290	12
ВАД1	T	420	290	8	440	340	7	420	270	7	430	310	10	-	-	-
	T1	430	300	7	450	360	6	-	-	-	-	-	-	410	290	7
Д1	T	370	200	15	380	200	15	380	220	11	380	230	12	360	180	6
Д16	T	420	280	13	440	280	10	420	280	6	430	310	15	-	-	-
	T1	465	355	12	465	360	8	-	-	-	445	370	11	-	-	-
Д19	T1	430	280	12	435	280	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B95	T1	520	440	14	-	-	-	-	-	-	600	550	8	610	550	10
B96	T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	680	640	7	-	-	-

Окончание табл. 11.2

Сплав	Состояние	Лист $s = 2$ мм			Лист $s = 10$ мм			Плитка $s = 20$ мм			Профиль			Поковка $m = 80 \dots 100$ кг		
		$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$
<i>Магниевые сплавы</i>																
МА1	М	220	140	8	200	130	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	240	—	4	—	—	—
МА8	М	260	140	15	230	120	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	210	110	10	220	—	10	—	—	—
МА20	М	240	160	20	220	150	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	210	110	20	250	180	20	—	—	—
МА2	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	270	170	12	270	170	8
МА2-1	М	270	170	14	270	170	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	270	160	16	180	170	10	240	—	5
МА15 (ВМД3)	М	270	200	6	250	180	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	270	200	5	280	230	5	270	170	5
МА19 (ВМД6)	Б/т.о.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Пруток		—
МА14 (ВМ65-1)	T3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	340	290	10	300	250	12
МА12	T1	300	200	7	280	180	6	—	—	—	—	—	—	280	150	8
МА5	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	310	220	8
МА11	T1	—	—	—	—	—	—	280	150	12	—	—	—	270	130	12

Условные обозначения: М – мягкий, отожженный; П – полунаагартованный; Н – нагартованный; Т – закаленный и естественно состаренный; Т1 – закаленный и искусственно состаренный; Т3 – искусственно состаренный; Б/т.о. – без последующей термообработки.

### 11.3. Сварочные дефекты (поры, вольфрамовые включения и др.), допустимые без исправления

Толщина свариваемого материала $s$ , мм	Категория сварочных соединений													
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	Единичные дефекты		Скопление мелких дефектов (на площади 1 см <sup>2</sup> при протяженности ≤20 мм)						Цепочка мелких дефектов					
До 3	0,4s	0,5s	0,2s	0,25s	2,5	2	6	8	0,1s	0,15s	3	2	15	20
3...6	1,5	1,7	0,6	0,7	3,0	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
6...10	1,8	2,0	0,8	1,0	4,0	3	10	1,5	0,7	0,8	4	3	20	25
>10	2,5	3,0	1,0	1,2	5,0	4	—	—	0,9	1,0	—	—	—	—

**Примечания.** 1. Независимо от толщины свариваемого материала допускаются единичные дефекты на 100 мм шва в количестве 3 шт. (I категория) и 5 шт. (II категория).  
 2. Скопление мелких дефектов: для I категории на 100 мм шва – два участка; для II категории на 100 мм шва – три участка.  
 3. Цепочка мелких дефектов: для I категории на 100 мм шва – один; для II категории на 100 мм шва – два дефекта.

### 11.4. Сварочные дефекты (подрезы, смещение кромок), допустимые без исправления

Толщина свариваемого материала $s$ , мм	Категория сварочных соединений													
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	Подрез в зоне сплавления со стороны шва						Смещение свариваемых кромок							
	глубиной $h_1$		длиной $L$		на расстоянии между дефектами $l$		суммарной протяженностью $\Sigma L$		по высоте $H_1$		по высоте $H$		длиной $L$	
мм, не более														
До 3	0,04s	0,1s	—	—	—	—	—	—	0,1s	0,15s	0,2s	0,3s	—	—
3...6	—	0,3	50	80	80	50	0,1L <sub>w</sub>	0,15L <sub>w</sub>	—	—	—	—	0,1L <sub>w</sub>	0,15L <sub>w</sub>
6...10	0,25	0,35	—	—	—	—	—	—	0,1s	0,15s	2,0	3,0	(<200)	(<250)

**Примечание.**  $L_w$  – длина шва.

Во избежание образования ГТ следует обращать внимание на жесткость стыкуемых деталей. При сварке деталей с резким перепадом толщины необходимо предусматривать со стороны точеных деталей (фланец, шпангоут и др.) полку, длина которой должна составлять  $2s$ , где  $s$  – толщина стыкуемых деталей в зоне сварки, но  $\geq 30$  мм. Для уменьшения жесткости свариваемых деталей из тонколистового материала ( $s < 2$  мм) рекомендуется зиговка заготовок.

В зависимости от толщины материала при сварке врезных фланцев на цилиндрических и сферических поверхностях устанавливается минимально допустимый диаметр: для материалов толщиной до 2 мм – диаметр  $\geq 60$  мм, при толщине до 6 мм  $\geq 120$  мм и т.д. Наблюдаются трещины при сварке в ЗТВ, если шероховатость поверхностей свариваемых элементов составляет  $Rz > 40$  мкм.

При выполнении соединения в отбортовку на сплавах с  $\sigma_b > 250$  МПа (AMg5, AMg6, D20 и др.) очень часто на практике в районе гиба наблюдаются микронадрывы, которые являются очагом образования трещины при сварке. Следует избегать соединений по кромке, так как в них возможно появление несплавления и трещин в корне шва из-за наличия оксидной пленки на поверхности металла. При изготовлении изделий со швами различной протяженности рекомендуется в первую очередь выполнять швы большой протяженности и швы максимального сечения, а затем короткие швы.

**Оксидные пленки.** Высокая химическая активность алюминия, магния и их сплавов с кислородом приводит к образованию на поверхности металла оксидов ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ). Толщина пленки при комнатной температуре увеличивается со временем. Оксидные пленки относятся к группе плотных пленок ( $Al_2O_3$   $\gamma = 4,00$ ;  $MgO$   $\gamma = 3,65$ ), которые предохраняют металл от дальнейшего окисления и взаимодействия его с окружающей средой. На поверхности двойных сплавов алюминия с содержанием меди, марганца, кремния, железа, цинка образуется оксидная пленка, по структуре аналогичная пленке на чистом алюминии.

По данным А.В. Курдюмова, при содержании в сплаве  $<0,02\%$  Mg в оксидной пленке обнаруживаются шпинель  $MgAl_2O_4$  и  $\gamma-Al_2O_3$ , при  $0,01\dots 0,1\%$  Mg оксидная пленка состоит из  $MgAl_2O_4$  и  $MgO$ . В оксидной пленке преобладает  $MgO$  при содержании в алюминиевых

сплавах  $> 1\%$  Mg. Наличием рыхлой оксидной пленки  $MgO$  на поверхности магниевых и магниево-алюминиевых сплавов объясняется их повышенная склонность к пористости при сварке. Введение малых добавок бериллия в сплавы системы Al – Mg снижает окисляемость в детальном раз.

Тугоплавкая пленка на поверхности металла ( $T_{пл}^{Al_2O_3} = 2050$  °C;  $T_{пл}^{MgO} = 2800$  °C) с высоким электросопротивлением плохо влияет на стабильность протекания процесса сварки. Оксидная пленка не плавится и не растворяется в жидким металле сварочной ванны. К этому следует добавить, что она активно адсорбирует влагу. При нагреве происходит диссоциация пара с выделением водорода – основного источника пор в сварных швах.

В связи с этим для обеспечения формирования наплавленного металла при сварке необходимо разрушить оксидную пленку. Это достигается катодным распылением при горении сварочной дуги в среде аргона (переменный ток, постоянный ток на обратной полярности) или за счет высокой концентрации теплоты при сварке в гелии на постоянном токе прямой полярности.

**Пористость.** Многолетняя статистика брака сварных конструкций позволяет установить, что одним из основных дефектов (~48 %) при сварке алюминиевых и магниевых сплавов является пористость.

Исследования взаимодействия алюминия и магния с различными газами показали, что наибольшую растворимость в них имеет водород. Так, анализ газов в алюминии при температуре 1200 °C выявил следующее соотношение (в %): 78 H, 12 CO, 4 CO<sub>2</sub>, 6 N. В твердом алюминии водород практически нерастворим ( $S_{тв}^{H_2} = 0,036$  см<sup>3</sup> / 100 г). Заметная растворимость наблюдается лишь с увеличением температуры до  $\geq 660$  °C ( $S_{*}^{H_2} = 0,69$  см<sup>3</sup> / 100 г) и находится в зависимости от времени выдержки и давления газа над расплавом. Значительно увеличивается растворимость водорода в магнии в жидком и твердом состояниях ( $S_{*}^{H_2} = 51$  см<sup>3</sup> / 100 г и  $S_{тв}^{H_2} = 19$  см<sup>3</sup> / 100 г).

Растворимость водорода в алюминии снижается при введении меди, кремния и скандия, тогда как присадка марганца, никеля, магния, железа, хрома, цинка, титана, наоборот, ее повышает.

Причиной образования пористости в сварных швах из алюминиевых и магниевых сплавов является водород. К основным источникам появления водорода при сварке в инертных газах следует отнести: влажность защитной инертной среды, загазованность основного и присадочного металлов, а также присутствие влаги на поверхности свариваемого материала. При этом основной объем газа (~60 %) приходится на поверхность металла сварочной проволоки.

Основные направления в разработке средств повышения плотности сварного соединения предполагают:

- химическую, тепловую и механическую обработку поверхности (травление, подогрев проволоки в аргоне до 250...300 °C, шабрение кромок  $Rz < 40 \text{ мкм}$ );
- соблюдение нормативной длительности хранения материала перед сваркой (основной металл после шабрения  $< 3 \text{ ч}$ ; сварочная проволока после химического травления  $< 8 \text{ ч}$ );
- обеспечение культуры производства (влажность 70...80 %, запыленность – IV класс чистоты, температура 18...20 °C);
- уменьшение доли участия поверхности сварочной проволоки при формировании наплавленного металла (увеличение диаметра сварочной проволоки с 1,5 до 3 мм: освоение формы разделки кромок под сварку С1, С3 вместо С5 и С6, уменьшение числа проходов при выполнении сварочного соединения);
- эффективное воздействие на условия кристаллизации жидкого металла сварочной ванны (скорость всплыивания пузырька должна превышать скорость кристаллизации, чему способствуют подогрев, погонная энергия дуги, дополнительные источники теплоты: двухдуговая, трехфазная сварка и т.д.);
- механическое воздействие на жидкий металл сварочной ванны (обработка ультразвуком при сварке, магнитное перемешивание и др.).

**Вольфрамовые включения.** Сварку алюминия, магния и их сплавов проводят, как правило, неплавящимся (вольфрамовым) электродом в атмосфере инертного газа. Высокая температура плазмы электрической дуги, достигающая 6000...10 000 K, и высокая плотность тока ( $\sim 10^4 \dots 10^6 \text{ A/cm}^2$ ) создают значительные тепловые нагрузки на электрод, работающий в условиях дугового разряда. Сниже-

ние дефектности по вольфрамовым включениям в сварном соединении возможно повышением эрозионной стойкости вольфрама, достигаемым введением оксидов (оксид лантана или оксид иттрия и др.). Стойкость к токовым нагрузкам вольфрама марки ВЧ меньше, чем у других марок (ВЛ, СВИ, ВИ). Более долговечен в эксплуатации благодаря высокой эмиссионной способности вольфрам с оксидом лантана (ВЛ) или оксидом иттрия (ВИ-20, ВИ-30, СВИ-1). Этот вольфрам поддерживает более высокую устойчивость дугового разряда.

Оптимизация технологии сварки способствует уменьшению тепловой перегрузки электрода со стабильной защитой от воздействия окружающей среды. Для уменьшения перегрева регламентируется продолжительность выполнения сварки. Следует избегать коротких замыканий электрода при сварке, обратив особое внимание на условия выполнения сварного соединения (труднодоступные места, сварка в пространственном положении и т.д.).

Наибольшая стойкость вольфрама при сварке на постоянном токе прямой полярности, меньшая – при переменном токе, минимальная – при постоянном токе обратной полярности. Оптимальный расход газа обеспечивает стабильный процесс горения дуги и хорошую защиту вольфрама от воздействия окружающего воздуха, отчего повышается стойкость и уменьшается дефектность в сварных соединениях.

## 11.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Особенности технологии сварки.** Наибольшее распространение при изготовлении сварных конструкций из легких цветных сплавов получила дуговая сварка в инертных газах.

Особенности сварки алюминиевых и магниевых сплавов предопределяют повышенные требования к ее технологии. Первостепенное значение приобретает культура производства. В сборочно-сварочных цехах не допускается выполнение работ, связанных с интенсивным образованием пыли и дыма (газовая резка, электродуговая сварка, зачистка абразивными кругами и т.п.). Алюминиевые и магниевые сплавы необходимо сваривать в чистых помещениях, которые должны быть соответствующим образом отделаны и тщательно убраны. Все подгоночные и сварочные работы следует

выполнять в чистой специальной одежде и сухих чистых хлопчатобумажных перчатках. Сварные изделия изготавливают в цехах с относительной влажностью воздуха  $\leq 70\%$ , в районах повышенной влажности  $\leq 80\%$ . При этом цеховая температура поддерживается для холодного периода в пределах  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ , а для теплого  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Наиболее целесообразным по обеспечению качества сварных швов является химический способ обработки поверхности основного металла и проволоки. После химического травления допустимая продолжительность хранения заготовок перед механической зачисткой свариваемых поверхностей  $\leq 120$  ч (I и II категории сварных соединений) и 200 ч (для соединения III категории).

Детали, прошедшие механическую обработку (шабрение, фрезерование и др.), поступают на сварку не позднее 3; 5 и 8 ч (для сварных соединений соответственно I, II и III категорий). Срок хранения проволоки после химического травления  $\leq 8$  ч. При хранении ее в герметичной упаковке (под вакуумом, в среде инертных газов) этот срок возрастает до 72 ч.

При отработке технологического процесса сварки конкретного узла необходимо обращать внимание на точность сборки заготовок под сварку и возможность применения сборочно-сварочной оснастки.

**Механические свойства сварных соединений.** Исходя из условий работоспособности и надежности в процессе эксплуатации сварных конструкций разработчик изделия определяет категорию ответственности сварного соединения: I – особо ответственное, II – ответственное и III – неответственное (табл. 11.5).

При оценке степени ответственности сварного элемента надо помнить, что в конструкциях со сварными соединениями в наплавленном металле швов могут возникать напряжения двух родов – рабочие и связующие. С учетом этого к I и II категориям следует относить сварные соединения, в которых действуют рабочие напряжения, III категорию составляют сварные соединения со связующими напряжениями.

Временное сопротивление стыкового сварного соединения с усилием зависит от способа сварки, толщины свариваемого мате-

риала и определяется коэффициентом разупрочнения сваркой основного металла (табл. 11.6).

Наряду с оценкой горячеломкости при сварке для общей оценки свариваемости необходимо располагать данными о работоспособности сварных соединений по отношению к основным металлам при статическом растяжении, повторно статическом и усталостном нагружениях (табл. 11.7 и 11.8).

Одним из мероприятий по обеспечению равнопрочности (при сохранении пластических характеристик) сварного соединения при сварке сплавов в нагартованном или термически обработанном состоянии является утолщение кромок в зоне сварки, полученное механической обработкой или химическим фрезерованием. Что касается толщины зоны утолщения кромок стыкуемых деталей, то она определяется расчетным путем, исходя из условий равнопрочности сварного соединения с основным металлом. К важнейшим рычагам повышения механических свойств сварных соединений относятся проковка, прокатка роликами сварного соединения в холодном или теплом состоянии. Названные технологические операции подлежат всесторонней проверке с целью определения их влияния на пластичность и коррозионную стойкость сварных соединений.

При сварке термически упрочняемых сплавов можно поднять прочность сварного соединения до уровня основного металла последующей (после сварки) термообработкой сварного узла (закалка + искусственное старение). При этом искусственное старение сварных соединений повышает предел выносливости на 15...20 МПа (табл. 11.8).

**Коррозионная стойкость сварных соединений.** В табл. 11.7 дана общая оценка коррозионной стойкости основного металла и сварных соединений серийных алюминиевых сплавов. Приведенные в ней сведения следует рассматривать как ориентировочные, ибо отдельные виды полуфабрикатов, технология их изготовления, а также условия эксплуатации могут существенно влиять на их коррозионную стойкость. Так, например, нагартовка сплава АМг6 перед сваркой приводит к уменьшению сопротивляемости межкристаллитной коррозии, особенно в загрязненной атмосфере и морской среде. Для защиты от коррозии рекомендуются анодно-оксидные, химические и лакокрасочные покрытия.

### 11.5. Характеристика категорий ответственности сварных соединений

Категория сварных соединений	Назначение сварного узла	Контроль сварного узла		Автоматизация, %	Квалификация рабочих (разряд)		Дефектность сварного соединения		Культура производства			Повторные нагревы (подварки)	
		Способ	Объем, %		Автоматическая сварка	Ручная сварка	Сварщик	Слесарь-сборщик	Трещины	Окисленные пленки	Поры	Вольфрамовые включения	
I	Особо ответственный	Рентген	100	100	0	VI	V	Не допускаются (см. табл. 11.3)	Допускаются (см. табл. 11.3)	VI	70...80	18...20	До 2 раз
II	Ответственный	Ультразвук	Выборочно		80	20	V	IV		V	80...90	16...24	До 3 раз
III	Не ответственный	Визуально		100	0	100	IV	III		—	90	—	—

### 11.6. Коэффициент разупрочнения ( $\eta_{\sigma} = \sigma'_b / \sigma_b$ ) основного металла

Состояние материала до и после сварки	Категория сварного соединения	Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом для толщин, мм			Автоматическая дуговая сварка неплавящимся электродом для толщин, мм		
		≤3	3...10	≥10	≤3	3...10	≥10
<i>Термически неупрочняемые сплавы</i>							
Отжиг + сварка	I	0,9	0,85	0,8	0,9	0,9	0,85
	II	0,85	0,8	0,75	0,9	0,85	0,80
	III	0,70	0,6	0,5	0,8	0,7	0,6
<i>Термически упрочняемые сплавы</i>							
Закалка + искусственное старение + сварка	I	0,6	0,55	0,5	0,65	0,6	0,55
	II	0,55	0,5	0,45	0,6	0,55	0,5
	III	0,5	0,45	0,4	0,55	0,5	0,45
Закалка + сварка + искусственное старение	I	0,7	0,65	0,6	0,75	0,7	0,65
	II	0,65	0,6	0,55	0,7	0,65	0,6
	III	0,6	0,5	0,45	0,65	0,6	0,5

Примечания. 1. Термически неупрочняемые сплавы:  $\sigma'_b$  – временное сопротивление разрыву основного металла в отожженном состоянии.

2. Сплавы, термически упрочняемые:  $\sigma'_b$  – временное сопротивление разрыву основного металла в исходном состоянии, закаленном, искусственно состаренном.

**11.7. Оценка работоспособности и пластичности сварного соединения, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом  
(лист толщиной 2 мм)**

Сплав	Проволока	Состояние	Работоспособность			Технологическая пластичность $\eta_a$	
			$\eta_a$	$\eta_{K^*}$	$\eta_R$		
<i>Алюминиевые сплавы</i>							
АД0	Св. А97	M + св.	1,00	—	0,85	1,0	
АД1	Св. А5		0,95	—	—		
АМц	Св. АМц		0,9	0,75	0,9		
АМг1	Св. АМг1			—	—		
АМг2	Св. АМг2		0,95	0,9	0,7	0,9	
АМг3	Св. АМг3		0,9	0,85	0,5		
АМг4	Св. АМг4			0,75	0,75		
АМг5	Св. АМг5			0,8	0,6		
АМг6	Св. АМг6				0,45	0,75	
Д20	Д20	Ti + св.	0,7	0,85	0,75		
1201	Св. 1201			0,8	0,7	1,15	
1205	0,65		—	—	0,75		
АД31	Св. АК5		0,8	0	—	0,5	
АД33			0,75	0,7	0,5	0,65	
АД35				—	—	0,7	
AB			0,7	—	—	0,65	
B92ц	Св. В92ц		0,85	0,65	0,6	0,9	
1915	Св. 1557				—	1,2	
ВАД1	ВАД1		0,8	—	0,7	0,7	

Окончание табл. 11.7

Сталь	Проволока	Состояние	Работоспособность			Технологическая пластичность $\eta_a$
			$\eta_o$	$\eta_{R'}$	$\eta_R$	
<i>Магниевые сплавы</i>						
MA1	MA1	M + св.	0,8			0,9
MA8	MA2-1		0,7			1,7
MA20	MA20-1		0,9			0,8
MA2	MA2-1			-	-	1,1
MA2-1	MA2-1		0,8			
MA15	MA15					1,2
MA12	MA12	T1 + св.	0,7			1,1
MA5	MA5	T3 + св.	0,9			1,2

**Примечания.** 1.  $\eta_o = \sigma'_s / \sigma_s$  – коэффициент работоспособности сварного соединения при растяжении.

2.  $\eta_{R'} = \sigma'_{R'}/\sigma_R$  – то же, при повторно-статическом нагружении;  $N = 20 \cdot 10^3$  циклов;  $f = 0,7 + 0,16$  Гц.

3.  $\eta_R = \sigma'_R/\sigma_R$  – то же, при усталостном нагружении;  $N = 5 \cdot 10^7$  циклов;  $f = 47$  Гц.

4.  $\eta_a = \alpha'/\alpha$  – коэффициент технологической пластичности сварного соединения при изгибе.

**Условные обозначения:**  $\sigma_R$  – предел выносивости, МПа;  $\sigma'_R$  – то же, ограниченный.

## 11.8. Эксплуатационные характеристики основного металла и сварных соединений

Сплав	Присадочная проволока	Температура испытаний, °C						Сварочные напряжения и деформации			Общая коррозионная стойкость	Склонность к межкристаллитной коррозии	Склонность к коррозионному растрескиванию		
		+20		-196	+100	+200	+300	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\epsilon_{\text{пред}}$ , $10^4 \%$	$\Delta_{\text{поп}}$ , мм					
		$\sigma_b$ , МПа	Угол загиба $\alpha$ , °	Предел выносливости $\sigma_{\delta}$ , МПа	Ограничительный предел выносливости $\sigma'_b$ , МПа										
<i>Алюминиевые сплавы</i>															
АД1	Св. А5	80 80	180 180	40 35	—	170 160	65 60	37 35	20 20	—			OA OA		
АМц	Св. АМц	120 110		60 55	105 80	210 170	95 95	70 70	45 40	60	4,4	0,43			
АМг1	Св. АМг1			—	—	220 200	100 100	80 80	50 48	—					
АМг2	Св. АМг2	190 180		70 50	210 180	300 240	180 160	130 120	65 60	30	3,2	0,55			
АМг3	Св. АМг3	220 200	180 160	100 50	200 170	320 260	210 180	150 140	70 65	35	1,8	0,6	OA OA		
АМг4	Св. АМг4	280 260	160 140	110 80	260 200	380 310	260 240	170 160	90 80	55	5,2	0,54			
АМг5	Св. АМг5	300 280	140 120	120 75	270 210	420 370	270 260	180 170	110 90	—					
АМг6	Св. АМг6	340 320	120 90	140 60	280 220	460 400	320 290	190 180	140 120	75	4,6	0,53	OA A		

Продолжение табл. 11.8

Сплав	Присадочная проволока	Температура испытаний, °C							Сварочные напряжения и деформации			Общая коррозионная стойкость	Склонность к межкристаллитной коррозии	Склонность к коррозионному растрескиванию		
		+20			-196	+100	+200	+300	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\varepsilon_{prod} \cdot 10^3 \%$	$\Delta_{non} \text{мм}$					
		$\sigma_b$ , МПа	Угол загиба $\alpha$ , °	Предел выносимости $\sigma_x$ , МПа	Ограниченнный предел выносливости $\sigma'_x$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа										
Д20	Д20	400 280	80 60	80 60	300 260	480 440	360 2500	180 140	280 240	95	7,6	0,51	Б Б	А А	ОА ОА	
1201	Св. 1201	440 320	100 70	100 70	290 230	510 460	340 270	209 160	240	62	4,8	0,48				
1205	Св. 1201	440 280	—	—	—	540 440	360 260	300 220	200 160	—	—	—	ОА ОА	А А	ОА ОА	
АД31	Св. АК5	240 190	140 70	—	—	340 270	210 150	160 110	60 50	—	—	—				
АД33	Св. АК5	300 200	70 60	120 160	290 200	420 320	260 180	190 130	80 70	85	2,0	0,54	Б Б	А А	Б Б	
АД35	Св. АК5	320 240	70 50	—	—	400 290	250 190	200 140	90 80	—	—	—				
АВ	Св. АК5	320 230	80 50	—	—	410 310	300 210	240 170	100 90	—	—	0,53	А А	А А	Б Б	
В92ц	Св. В92ц	420 360	100 90	—	120 70	320 200	500 440	380 340	270 240	140 80	110	10,2	Б Б	А А	Б Б	
1915	Св. 1557	380 320	60 70	—	—	300 190	450 400	320 290	220 180	120 90	55	2,5	0,42	А А	А А	Б Б
ВАД1	ВАД1	430 340	100 70	100 70	320 10	510 420	410 320	340 270	180 150	50	4,0	—	Б Б	Б Б	Б Б	

## Окончание табл. 11.8

Сплав	Присадочная проволока	Температура испытаний, °C					Сварочные напряжения и деформации			Общая коррозионная стойкость	Склонность к межкристаллитной коррозии	Склонность к коррозионному растрескиванию
		+20		-196	+100	+200						
		$\sigma_s$ , МПа	Угол загиба $\alpha$ , °	Предел выносливости $\sigma_k$ , МПа	Ограниченнный предел выносливости $\sigma'_k$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{max}$ , МПа	$\varepsilon_{prod.} \cdot 10^4$ %	$\Delta_{defl.}$ , мм			
MA1	MA1	220 180	80 70	75 —			176 170	170 100		A A		OA OA
MA8	MA2-1	250 200	35 60	70 —			200 160	138 120		B B		OA A
MA20	MA20-1	240 215	80 60	100 —			190 150	136 114		B D		A A
MA12	MA12	300 190	45 50	70 —			340 200	230 170	210 130	B B		Б Б
MA2	MA2-1	270 200	60 55	100 —			400 320	210 158	—	B Б		Б Б
MA2-1	MA2-1	270 220	50 65	100 —			380 340	215 192	135 120	Б Б		Д —
MA15	MA15	310 270	50 45	130 —			—	—	—	Б Б		Д —
MA5	MA5	270 240	48 60	110 —			190 170	140 120		Б Б		А А

**Примечания.** 1. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Лист толщиной 2 мм, сварное соединение с выпуклостью и проплавом. Состояние материала: сплав термически неупрочняемый (отжиг + сварка), сплав термически упрочняемый (закалка + искусственное старение + сварка), сплав B92ц (закалка + естественное старение + сварка + естественное старение, 3 мес.).

2. При испытании на повышенных температурах время выдержки 30 мин.
3. Предел выносливости определяется на базе  $N = 50 \cdot 10^7$  при  $f = 47$  Гц.
4. Ограниченный предел выносливости определяется на базе  $N = 20 \cdot 10^7$  при  $f = 0,007 \dots 0,16$  Гц.
5. Сварочные напряжения и деформации определялись по методике МВТУ им. Н.Э. Баумана.
6. Оценка коррозионной стойкости: ОА – весьма стойкие; А – стойкие; Б – удовлетворительная стойкость; Д – пониженная стойкость.
7. В числителе – основной металл, в знаменателе – сварное соединение.

### 11.3. МЕДНЫЕ СПЛАВЫ

#### 11.3.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕДНЫХ СПЛАВАХ

Медь и сплавы на ее основе широко применяются во многих отраслях современной техники, что объясняется в первую очередь их специфическими физико-механическими свойствами: высокой тепло- и электропроводностью, стойкостью против коррозионных и эрозионных разрушений в ряде агрессивных сред, высоким уровнем механических свойств при низких температурах и др.

В промышленности используют медь различных марок в зависимости от чистоты по ГОСТ 859–2001 (табл. 11.9).

При обычных условиях медь достаточно инертна, но при нагревании она реагирует с кислородом, серой, фосфором, галогенами, водородом, образуя неустойчивый гидрид CuH; с углеродом образует взрывоопасную ацетиленистую медь  $Cu_2C_2$ ; с азотом практически не реагирует, что позволяет использовать его в качестве защитного газа при сварке чистой меди.

*Взаимодействие с кислородом.* Кислород, если не применять соответствующих защитных мер, окисляет медь при высоких температурах. Темп окисления существенно возрастает при температуре меди  $>900\text{ }^{\circ}\text{C}$  и особенно тогда, когда она расплавлена.

Кислород в меди находится в связанном состоянии – в виде закиси меди ( $Cu_2O$ ), которая образует с медью эвтектику ( $Cu + Cu_2O$ ) с температурой плавления  $1065\text{ }^{\circ}\text{C}$ , несколько

меньшей температуры плавления меди. Поэтому при охлаждении расплавленной меди, затвердевая, эвтектика располагается по границам кристаллитов меди, тем самым ухудшая ее механические и технологические свойства. В то же время при нагревании до  $1065\text{ }^{\circ}\text{C}$  твердой меди, содержащей кислород, эвтектика оплавляется на границах кристаллитов меди, охрупчивая металл. Все это может привести к образованию трещин в металле при его нагружении, в том числе вызванном сварочными напряжениями.

Температура плавления закиси меди (не в виде эвтектики)  $1235\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выше температуры плавления меди. При охлаждении закись меди также затвердевает по границам кристаллитов меди, снижая ее механические свойства.

Кислород, содержащийся в меди, ухудшает ее пластичность, повышает твердость, уменьшает тепло- и электропроводность.

*Взаимодействие с серой.* Сера хорошо растворима в жидкой меди и практически нерастворима в твердой. Содержание серы в меди регламентирует ГОСТ 859–2001, и ее присутствие в ограниченном количестве [до 0,1 % (мас.)] существенно не отражается на сварке.

*Взаимодействие с водородом.* Водород влияет на качество сварных соединений из меди и ее сплавов, вызывая пористость в металле шва и образуя трещины. Водород растворяется в меди в соответствии с законом Сивертса, и его растворимость зависит от температуры и парциального давления в газовой

#### 11.9. Химический состав меди

Марка меди	Массовая доля $Cu + Ag$ , %, не менее	Массовая доля допустимых примесей, %, не более							
		Pb	Si	Sn	Sb	As	S	$O_2$	P
M006	99,99	0,001	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,0005
M06	99,97	0,003					0,003		0,0020
M16	99,95	0,004	0,0010	0,002	0,002	0,002		0,003	
M1	99,90	0,005					0,004	0,050	–
M2p	99,7		0,0020		0,005	0,010		0,010	0,0600
M3p	99,50	0,010	0,0030	0,050	0,050	0,050	0,010		
M2	99,7		0,0020		0,005		0,010	0,070	–
M3	99,5	0,050	0,0030		0,050			0,080	

**Примечание.** Тире означает, что заданная примесь не нормируется.

атмосфере. Растворимость водорода в меди при кристаллизации изменяется почти в 2 раза сильнее, чем в железе. Это приводит к тому, что при высокой скорости кристаллизации сварочной ванны в процессе сварки меди газ не успевает выделяться из металла, образуя поры или концентрируясь в микронесплошностях, и создает высокое давление, при котором зарождаются трещины.

При сварке не исключена возможность образования дефектов в результате термической диффузии водорода из основного металла к шву. Накапливаясь вблизи линии сплавления, водород создает пористость в ОШЗ. Поэтому при сварке ответственных изделий из меди, в которых необходима высокая плотность металла, к основному металлу необходимо предъявлять жесткие требования по содержанию в нем водорода. Электрошлиаковый переплав или вакуумная плавка значительно снижают содержание водорода в меди.

Основными типами сплавов на основе меди являются латуни и бронзы. Практическое применение получили латуни с содержанием до 50 % (мас.) Zn. Эти латуни по своей структуре могут быть как однофазными ( $\alpha$ - или  $\beta$ -латуни), так и двухфазными ( $\alpha + \beta$ -латуни). В пределах  $\alpha$ -твердого раствора, т.е. при содержании до 39 % (мас.) Zn, свойства латуней плавно изменяются: с увеличением содержания цинка повышается прочность латуни и

снижаются пластичность, тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость, а склонность к коррозионному растрескиванию возрастает.

Латуни, содержащие до 39 % (мас.) Zn, очень пластичны, хорошо свариваются и легко обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях, коррозионно-стойки. При больших концентрациях цинка образуются интерметаллиды ( $CuZn$ ,  $CuZn_2$  и др.), ухудшающие пластические свойства латуни. Алюминий уменьшает летучесть цинка, образуя на поверхности расплавленной латуни защитную пленку из оксида алюминия. Железо задерживает рекристаллизацию латуней и измельчает зерно, повышая механические и технологические свойства сплава. Кремний улучшает свариваемость латуней. Некоторые марки латуней приведены в табл. 11.10.

Из деформируемых сплавов для изготовления сварных конструкций чаще всего употребляется марка Л63, в значительно меньших объемах используются латуни марок Л68, Л90, ЛО62-1, ЛС59-1, ЛМц58-2. Что касается литьевых латуней, то их сваривают главным образом при производстве ремонтных работ и прежде всего при исправлении дефектных участков литья. Чаще других применяются латуни марок ЛЦ40Мц3Ж, ЛЦ16К4, в меньших объемах – латуни других марок.

### 11.10. Химический состав латуней

Марка латуни	Массовая доля допустимых примесей, %							
	Cu	Fe	Mn	Si	Al	Pb	Sn	As
<i>Сплавы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527-70)</i>								
Л63	62...65						–	
Л90	88...91		–	–	–	–	–	
ЛО62-1	61...63	–	–	–	–		0,7...1,1	–
ЛС59-1	57...60					0,8...1,9	–	
ЛМц58-2						–		
<i>Сплавы литьевые (ГОСТ 17711-93)</i>								
ЛЦ40Мц1,5	57...60	–	1,0...2,0	–	–	–	–	–
ЛЦ40Мц3Ж	53...58	0,5...1,5	3,0...4,0	–	–	–	–	–
ЛЦ16К4	78...81	–	–	3,0...4,5				

Примечание. Остальное – цинк.

Бронзы представляют собой сплавы меди с цинком, алюминием, марганцем, кремнием, бериллием, железом и другими элементами. Бронзы называют по основному легирующему компоненту. Бронзы делятся на две большие группы: оловянные, химический состав которых определяется ГОСТ 18175–78, 5017–74, 613–79, и безоловянные, химический состав которых определяется ГОСТ 493–79 и 18175–78.

В промышленности широко применяются сплавы меди с никелем. Легирование меди никелем существенно повышает ее механические свойства и коррозионную стойкость. К коррозионно-устойчивым сплавам можно отнести: мельхиор (МНЖМц30-1-1); нейзильбер (МНЦ15-20), в том числе нейзильбер свинцовистый (МНЦС17-18-1,8), куниаль (А-МНА13-3 и Б-МНА6-1,5), а также сплавы МН10 и МНЖ5-1, наиболее часто применяемые для изготовления сварных изделий. Они, особенно последний из названных сплавов, широко используются в виде труб, работающих в агрессивных средах, главным образом в контакте с морской водой, а также в виде листов и прутков (ГОСТ 492–73).

На изготовление сварных изделий из мельхиора идут листы, ленты, прутки, трубы и другие полуфабрикаты.

Сплавы на тройной основе медь – никель – цинк типа нейзильбер содержат 5...35 % (мас.) Ni и 13...45 % (мас.) Zn. Наибольшее распространение получил сплав, содержащий 15 % Ni и 20 % Zn (МНЦ15-20). Он представляет собой тройной твердый раствор никеля и цинка в меди. Нейзильбер обладает высокой коррозионной стойкостью на воздухе, в растворах солей и органических кислот и удовлетворительно сваривается.

### 11.3.2. ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Сварка чистой меди существенно отличается от сварки сталей в силу особенностей теплофизических свойств этих металлов. Вследствие высокой теплопроводности меди (почти в 6 раз большей, чем у стали) для сварки плавлением необходимо применять источники нагрева с большой тепловой мощностью. Высокие тепло- и температуропроводности меди создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения, а также определяют малое время существования сварочной ванны, что требует применения повышенной погонной энергии

или предварительного подогрева. Значительный коэффициент линейного расширения (КЛР) и его зависимость от температуры вызывают необходимость сварки при жестком закреплении кромок или по прихваткам. При большой толщине металла следует регулировать величину зазора в ходе сварки. Малое время существования сварочной ванны в жидком состоянии ограничивает возможности ее металургической обработки. В частности, при раскислении меди требуются более активные раскислители, чем при сварке сталей.

Высокая теплопроводность меди и сплавов на ее основе затрудняет получение высококачественного формирования сварного шва. Для обеспечения нормального формирования сварного шва здесь необходим в ряде случаев предварительный, а иногда и сопутствующий подогрев. Если не подогревать предварительно свариваемую конструкцию, то сварочный (присадочный) металл, расплавляясь в дуге, не будет обеспечивать стабильное сплавление с основным металлом конструкции. Это особенно сказывается на начальных участках сварного шва, на которых интенсивный теплоотвод в массу основного металла приводит к образованию непроваров.

Высокая теплоемкость этих металлов также затрудняет процесс образования сварных соединений, поскольку может вызвать перегрев во время сварки и образование прожогов. Чтобы исключить появление такого дефекта, необходимо в соответствующий момент уменьшить тепловложение в металле, что достигается либо уменьшением сварочного тока, либо увеличением скорости перемещения дуги, либо комплексом этих технологических приемов.

Высокий КЛР меди и сплавов на ее основе приводит к большим деформациям сварных изделий, а при охлаждении металла после сварки может быть причиной образования в них трещин. Особенно опасно то, что влияние высокого КЛР, в частности КЛР меди, сочетается с провалом прочности и пластичности металла в интервале температур 250...350 °C, поэтому прежде всего следует избегать жесткого закрепления конструкций при сварке.

Взаимодействие меди и сплавов на ее основе в расплавленном состоянии с газами и, в частности, их легкая окисляемость и способность растворять в себе водород могут привести к образованию пор и трещин в металле шва и по линии сплавления, а также трещин в ЗТВ.

Большая жидкотекучесть меди, превосходящая примерно в 2 – 2,5 раза такой же показатель для стали, не позволяет проводить на весу одностороннюю стыковую сварку с полным проплавлением кромок и хорошим формированием шва с обратной стороны. Для однопроходных стыковых швов требуется применение подкладок, плотно прилегающих к свариваемому металлу: медных, графитовых, из сухого асбеста, флюсовых подушек и др. Большая жидкотекучесть меди затрудняет также сварку в вертикальном и особенно в потолочном положениях.

При сварке латуней окисление металла не опасно, так как цинк является хорошим раскислителем, связывающим кислород, поэтому металл шва достаточно раскислен. При растворении водорода в жидком металле значительно интенсивнее начинает испаряться цинк. Вместе с тем, любое выгорание и испарение цинка снижают прочность металла шва. Поэтому при электродуговых видах сварки и газовой сварке для уменьшения потерь цинка в сварочные прутки, проволоки, флюсы, покрытия электродов и т.д. вводят более активные раскислители, например кремний, образующий тугоплавкий оксид  $\text{SiO}_2$ , температурный интервал кристаллизации которого 1625...1750 °C. Пленка этого оксида покрывает ванну жидкого металла и препятствует окислению и испарению цинка.

При сварке алюминиевых латуней (и особенно алюминиевых бронз) окисление металла шва и рядом со швом приводит к интенсивному образованию пленки оксидов алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , температура плавления которого 2047 °C, т.е. в 1,7 – 1,8 раза выше температуры плавления этих сплавов. Пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  мешает самопротивольному растеканию металла шва и его формированию, засоряет шов шлаком, так как последний не растворяется в жидком металле, и снижает его качество (механические свойства и сплошность). Кроме того, могут появиться поры и трещины.

При сварке оловянных бронз металл шва может насыщаться газами и, в частности, водородом, что вызывает поры, а при неблагоприятных условиях – и трещины. У оловянных бронз из-за наличия вредных примесей (висмута, свинца) металл охрупчивается при температуре 390..650 °C. Для предотвращения трещин необходимо обеспечить минимальные жесткость сварных соединений и тепловложение, а при многопроходной сварке последующие проходы выполнять после охлаждения предыдущих.

При сварке кремниевых и кремнемарганцевых бронз окисление не опасно, так как кремний является хорошим раскислителем. При сварке бериллиевых бронз следует иметь в виду, что бериллий окисляется, особенно в расплавленном состоянии. Для бериллия характерна особенность поглощать азот при температуре >650 °C, при этом образуется нитрид  $\text{Be}_3\text{N}_2$ , отличающийся высокой твердостью. Твердый бериллий активно растворяет водород, еще большее растворение наблюдается в жидком металле, в котором растворение скачкообразно растет.

При сварке медно-никелевых сплавов возможны окисление металла шва и растворение в нем водорода, что приводит к появлению пор и повышает склонность к ГТ. Механизм образования этих дефектов аналогичен тому, что наблюдается при сварке меди. Образующая же закись никеля  $\text{NiO}$  имеет температуру плавления в 1,6 – 1,7 раза выше температуры плавления применяемых медно-никелевых сплавов, и так как  $\text{NiO}$  к тому же еще плохо выводится в шлаки, то она остается в шве, ухудшая его качество.

У алюминиевых бронз, особенно однофазных, наблюдается существенное понижение пластичности при температуре 395...695 °C. Поэтому во избежание образования трещин в швах и ЗТВ при сварке и заварке дефектных участков литья необходимо обеспечить минимальную жесткость в сварных соединениях наряду с ограниченной температурой предварительного подогрева.

При соблюдении необходимых требований сварные соединения обеспечивают установленный уровень эксплуатационной прочности сварных конструкций.

### 11.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ

#### 11.3.3.1. ПОДГОТОВКА ПОД СВАРКУ

Свариваемый металл и электродную проволоку перед сваркой тщательно очищают от оксидов и загрязнений до металлического блеска механически (шабером, наждачом и пр.) или химически (травлением в растворе, содержащем в 1 л 75 мл  $\text{HNO}_3$ , 100 мл  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 1 мл  $\text{HCl}$ , остальное – дистиллированная вода, с последующей промывкой в воде, затем обезжириванием). Кромку можно защищать механическим способом (наждачом, металлическими щетками и др.). Абразивным камнем поль-

зоваться не рекомендуется, так как оставляемые им на поверхности металла глубокие риски служат очагами последующих загрязнений и затрудняют обезжиривание органическими растворителями.

#### 11.3.3.2. ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Сварка в защитных газах меди и ее сплавов проводится неплавящимся и плавящимся электродами. Наиболее часто применяют механизированную сварку вольфрамовым электродом с подачей присадочного металла в виде проволоки непосредственно в зону дуги. Реже используют сварку плавящимся электродом.

В качестве защитных газов служат азот особой чистоты по МРТУ 6-02-375-66, аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79, гелий марок А и Б по ТУ 51-940-80, а также их смеси в соотношении 50...75 % (об.) Аг.

Медь сваривают неплавящимся вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности. Целесообразно использовать лантанированные или иттрированные вольфрамовые электроды по ГОСТ 23949-80. Неплавящимся вольфрамовым электродом сваривают в аргоне без предварительного подогрева медь толщиной до 4...5 мм, в гелии и азоте – толщиной до 6...8 мм. При сварке электрод распо-

лагают строго в плоскости стыка, наклон электрода 60...80° «углом назад».

При сварке в азоте швы более склонны к порообразованию, особенно при малых размерах сварочной ванны и повышенной скорости ее охлаждения. Это объясняется тем, что в азоте металл сварочной ванны проявляет тенденцию к уменьшению жидкотекучести. Расход защитного газа (в литрах в минуту) в среднем следующий: Аг 8...10; Не ≥10...20; N<sub>2</sub> 15...20. При сварке в среде азота применяются сварочные токи, на 10...15 % меньшие по сравнению с аргонодуговой сваркой (табл. 11.11).

Присадочные проволоки из чистой меди М1, М0 при сварке обеспечивают получение металла шва, по составу и физическим свойствам близкого к основному металлу, однако механические свойства сварного соединения понижены: наличие пористости уменьшает плотность металла шва. При введении в состав присадочных проволок раскислителей и легирующих компонентов механические свойства возрастают, но, как правило, снижается теплопроводность металла шва, что часто недопустимо. В таких случаях рекомендуются присадочные проволоки, легированные сильными раскислителями. Составы присадочных проволок приведены в табл. 11.12.

### 11.11. Ориентировочные режимы аргонодуговой сварки меди неплавящимся электродом

Толщина металла $\delta$ , мм	Диаметр неплавящегося электрода $d$ , мм	Диаметр присадки $d_{\text{пр}}$ , мм	Число проходов (кроме подварочного)	$I_{\text{св}}$ , А	Расход аргона, л/мин
1,2*	2,5...3,0	1,6	1	120...130	7,0...8,5
3,0*	3,5...4,0	2,5...3		230...240	
10 (V-образная разделка кромок)	4...4,5	3,0	3	Первый проход 200...350	7...8
		5,0		Второй проход 200...350	
		6,0		Третий проход 200...400	
		3,0		Подварочный шов 250...300	
19 (X-образная разделка кромок)	5...5,5	3,0	6	Первый, второй проходы 250...400	10...12
		5,0		Третий, четвертый проходы 250...400	
		6,0		Пятый, шестой проходы 300...550	

\* Без разделки кромок.

### 11.12. Марки присадочного материала для сварки меди и ее сплавов неплавящимся электродом

Марка свариваемого металла	Газ	Присадочный материал	
		Марка	Массовая доля, %, или ГОСТ
M1, M2, M3	Азот	МР3ТЦр60-0,1-0,1-0,1	0,08...0,14 РЗМ*, 0,08...0,04 Ti, 0,08...0,14 Zn, 0,08...0,14 В
		БрНЦр, БрХНТ	ГОСТ 16130-90
	Аргон, гелий	БрКМц3-1	ГОСТ 5222-72
		БрНЦр, БрХНТ, БрНЦрТ	ГОСТ 16130-90
БрХ0,8	БрХНТ	БрХНТ	ГОСТ 16130-90

\* Редкоземельный металл.

При сварке латуней, бронз и медно-никелевых сплавов предпочтительнее использовать вольфрамовый электрод. При этом испарения цинка и олова будут значительно меньше, чем при сварке плавящимся электродом.

Сварку меди плавящимся электродом в защитных газах ведут, как правило, на постоянном токе обратной полярности. Она применяется для меди толщиной  $\geq 6\dots 8$  мм. Рекомендуются V- и X-образные разделки. Производительность сварки меди в 2 – 3 раза выше, чем при сварке неплавящимся электродом. Однако при сварке в аргоне плавящимся электродом процесс неустойчив, с трудом устанавливается стабильный струйный перенос металла в сварочной дуге и сложно получить беспористые швы. При сварке в азоте эффективный и термический КПД дугового разряда выше, чем для аргона и гелия. Глубина проплавления получается выше, но устойчивость дугового разряда в азоте ниже, чем в аргоне и гелии. Несмотря на высокую чистоту защитных газов, медь при сварке окисляется и может возникать пористость, что определяет необходимость применения легированных присадочных и электродных проволок.

При сварке латуни плавящимся электродом используют бронзу, легированную алюминием с добавкой фосфора, а также БрКМц3-1. Режимы сварки латуни практически те же, что и при сварке листов меди. Предварительный подогрев необходим лишь при сварке листов толщиной  $> 12$  мм.

Высокие механические свойства соединений из бронзы получают при сварке в инертных газах. Так, на алюминиевой бронзе этот

способ позволяет получать наиболее прочные и пластичные соединения по сравнению с другими способами сварки.

#### 11.3.3.3. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Основным преимуществом автоматической сварки меди под флюсом является возможность получения стабильно высоких механических свойств без предварительного подогрева. Поэтому при изготовлении крупногабаритных сварных конструкций из меди больших толщин технологический процесс достаточно прост и почти не отличается от процесса сварки сталей.

Рекомендуемые сварочные материалы приведены в табл. 11.13. При этом следует иметь в виду, что при сварке под кислыми флюсами в шов переходят кремний и марганец, восстановленные из шлака. В результате ухудшаются теплофизические свойства меди и повышается ее электросопротивление по сравнению со свариваемой медью.

Металл толщиной до 20...25 мм сваривают одним электродом диаметром 4...5 мм без разделки кромок. При большей толщине металла рекомендуют U-образную разделку (приступление 5...8 мм) и двухэлектродную (из проволок диаметром 5 мм) сварку или сварку одним электродом диаметром 6 мм (табл. 11.14).

Для сварки латуни применяют плавленые флюсы (АН-20, ФН-10), а также специально разработанный для латуней флюс МАТИ-53. В качестве сварочных проволок используют бронзовые (БрКМц3-1, БрОЦ4-3) и латунные

### 11.13. Сварочные материалы для автоматической сварки меди под флюсом

Группы флюса	Марка флюса	Марка электродной проволоки
Высококремниевые марганцевые	AH348, ОСЦ-45М	БрКМц3-1, М1, БрЩЦ4-3
Низкокремниевый безмарганцевый	AH20C	
Среднекремниевый маломарганцевый	AH26C	
Бескислородный фторидный	AH-M1	M1

### 11.14. Ориентировочные режимы автоматической сварки меди под флюсом

Соединение	Толщина заготовки	Разделка кромок	$I_d$ , А	$U_d$ , В	$v_{cb}$ , м/ч
Стыковое	5...6	Без разделки	500...550	38...42	45...40
	10...12		700...800	40...44	20...15
	16...20		850...1100	45...50	12...8
	25...30	U-образная	1000...1100		8...6
	35...40		1200...1400	48...55	6...4
Угловое	16...20	Односторонняя	850...1000	45...50	12...8
	25...30		1000...1100		8...6

(ЛК80-3). Ориентировочный режим сварки латуни толщиной 12 мм: ток дуги  $I_d = 450...470$  А, напряжение дуги  $U_d = 30...32$  В,  $v_{cb} = 25$  м/ч, используется односторонняя сварка без разделки кромок в один проход. Предел прочности сварного соединения из латуни марок Л62, ЛМц58-2, ЛО62-1, выполненного проволокой БрОЦ4-3 под флюсом АН-20, без выпуклости шва составляет 245...343 МПа, а с выпуклостью 294...392 МПа, угол загиба 100...180°. Хорошо свариваются под флюсом бронзы (алюминиевые, хромистые, свинцововые и др.). Сварку бронзы, как и меди, выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Автоматическую дуговую сварку под флюсом применяют для соединения меди со сталью. Сварка проводится со смещением электрода на медь, практически без оплавления стали: расплавленная медь смачивает стальную кромку, и соединение образуется за счет диффузии меди в сталь. Применяется специальная разделка кромок: скос только медной кромки под углом 45° с притуплением, равным половине толщины. Стыковое или угловое соединение собирается без зазора, расстояние оси электрода от края медной кромки составляет 0,65...0,70 толщины меди. Режим сварки такой

же, как и при сварке медных соединений, но сварочный ток снижают на 15...20 %. Сварные соединения медь – низкоуглеродистая сталь обладают хорошими механическими свойствами:  $\sigma_b = 205...225$  МПа,  $\psi = 59...72$  %,  $KCu = 343...980$  кДж/м<sup>2</sup>.

#### 11.3.3.4. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТИМИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Такая сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности. Для прихватки и сварки применяют: электроды типа «Комсомолец», где стержень – из меди М1; электроды с покрытием ЗТ (стержень – БрКМц3-1); электроды марки АНЦ-1 или АНЦ-2, где стержень соответственно из бронзы БрХ07 или меди М1. Перед сваркой листов меди толщиной >4 мм электродами типа «Комсомолец», ЗТ и другими необходим местный подогрев до 200...300 °C. При большей толщине предварительный подогрев может быть до 500 °C. Ориентировочные режимы приведены в табл. 11.15.

Медь толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок, до 10 мм – с односторонней разделкой их при угле скоса до 60...70° и притуплении 1,5...3 мм. При большей толщине рекомендуется X-образная разделка.

### 11.15. Ориентировочные режимы ручной сварки стыковых соединений меди электродами типа «Комсомолец»

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	$I_{\text{св}}, \text{А}$	$U, \text{В}$
3	3...4	180...200	
4	4...5	220...270	25...27
5	5	300...350	
6	5	330...380	
7	5...6	350...400	26...28
8	6	380...420	
10	8	420...500	28...30

Для сварки латуней, бронз и медно-никелевых сплавов применяют электроды марок ММЗ-2, Бр1/ЛИВТ, ЦБ-1, МН-4 и др. Широкое применение нашли электроды с покрытием «Комсомолец-100».

Тепло- и электропроводность металла шва при сварке покрытыми электродами значительно снижаются. В процессе плавления электрода с покрытием в металл шва переходит часть легирующих компонентов и электропроводность шва составляет порядка 20 % от электропроводности меди М1. Механические свойства швов, выполненных дуговой сваркой покрытыми электродами, вполне удовлетворительны:  $\sigma_b = 176...196 \text{ МПа}$ , угол загиба 180°.

Ручная дуговая сварка латуни применяется редко, так как интенсивное испарение цинка затрудняет работу сварщика. При сварке латуни применяют предварительный подогрев, пониженные токи и повышенные скорости. Сварные соединения из латуни Л62 имеют  $\sigma_b = 243...340 \text{ МПа}$ , угол загиба 126...180°.

Сварку бронз покрытыми электродами выполняют постоянным током обратной полярности как с подогревом, так и без предварительного подогрева, применяемые токи 160...280 А, диаметр электродов 6...8 мм.

#### 11.3.3.5. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Этот способ обладает рядом преимуществ при соединении элементов из меди и ее сплавов больших толщин: возможностью осуществления больших тепловложений в свариваемые кромки и сварки стыковых соединений без разделки кромок, минимальным объемом механической обработки до и после сварки.

В качестве плазмообразующего газа используют смесь аргона с гелием (объемная доля гелия 80...85 %). Для защиты сварочной ванны от взаимодействия с атмосферой и хорошего формирования шва сварку можно выполнять по слою флюса (например, АН-26С).

Микроплазменной сваркой изготавливают трубы с толщиной стенки 0,2...0,5 мм из меди М1, латуней Л63, Л68, Л90, бериллиевой бронзы и др. Наиболее эффективная защита зоны сварки достигается при использовании закрытой микрокамеры, в которой располагается плазмотрон.

#### 11.3.3.6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА (ЭЛС)

ЭЛС весьма эффективна при изготовлении электровакуумных приборов. Так, при сварке особо чистой меди марки МБ обеспечиваются высокие механические свойства соединений с сохранением исходной чистоты металла в сварном шве и ОШЗ. При ЭЛС меди (табл. 11.16) возникают трудности, связанные с интенсивным испарением металла в вакууме при перегреве выше температуры плавления, а также с его высокой теплопроводностью. Поэтому сварку малых толщин выполняют неострофокусированным или колеблющимся пучком.

Большое влияние на режим ЭЛС меди оказывает содержание в ней примесей, увеличение их приводит к уменьшению глубины проплавления и размеров ЗТВ. Наличие в меди и особенно в ее сплавах легкоиспаряющихся элементов (кадмий, цинк, магний, свинец и др.) затрудняет и даже делает невозможной сварку этих сплавов электронным лучом. Из низколегированных медных сплавов наиболее широкое распространение получила бронза БрХ0,8, применяемая в конструкциях, работающих при повышенных температурах.

### 11.16. Ориентировочные режимы ЭЛС меди

Толщина меди, мм	$I_{\text{п}}, \text{mA}$	$U_{\text{yc}}, \text{kV}$	$v_{\text{св}}, \text{м/ч}$
1	70	14	20
2	120	16	20
4	200	18	18
6	250	20	18

Условные обозначения:  $I_{\text{п}}$  – ток электронного пучка;  $U_{\text{yc}}$  – ускоряющее напряжение.

Один из основных дефектов при ЭЛС – пористость как в металле шва, так и на линии сплавления. Весьма эффективно удается устранить пористость в результате повторных проходов. На меди М1 толщиной 5 мм уже после второго прохода центральная часть шва плотная, а все поры сосредоточены на линии сплавления. При увеличении числа проходов число пор на линии сплавления также уменьшается.

При ЭЛС меди и бронзы БрХ0,8 получают швы с мелкозернистой структурой и механическими свойствами, практически одинаковыми со свойствами основного металла.

#### 11.3.3.7. ДУГОВАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ

Сварка меди дуговым разрядом с полым катодом (ДРПК) при давлении в камере  $(5...8) \cdot 10^{-2}$  Па позволяет достичь наиболее высокого качества сварных соединений, и во многих случаях этот способ может конкурировать с ЭЛС меди. При сварке меди следует применять ДРПК на режимах, обеспечивающих максимальную плотность теплового потока. ДРПК можно сваривать за один проход медные листы без разделки кромок толщиной до 6 мм. При больших толщинах необходимо разделять кромки и сварку проводить с подачей присадочного металла. Ввиду большой жидкотекучести меди целесообразно использовать подкладки при сварке стыковых соединений толщиной  $>4$  мм (табл. 11.17).

Перспективно применение при сварке ДРПК прямоканальных вольфрамовых полых катодов, а в качестве плазмообразующего газа – азота и смеси гелия с азотом. При сварке в чистом азоте или смеси азота с гелием плотность теплового потока ДРПК несколько выше, чем при сварке ДРПК с подачей через полость катода аргона.

#### 11.17. Ориентировочные режимы сварки стыковых соединений ДРПК меди

Толщина металла, мм	$I$ , А	$U$ , В	$v_{cb}$ , см/с
4	170...180	23...24	1,4...1,5
6	220...230	24...25	
8	250...270		1,3...1,4
10	290...310	25...26	1,1...1,2

**Примечание.** Диаметр полого катода  $d_k = 3$  мм,  $Q = 0,8...1,2$  мг/с,  $l = 12$  мм.

При сварке ДРПК порообразование имеет особенности, обусловленные спецификой процесса. Так, наличие вакуума способствует дегазации расплавленного металла, что благоприятно сказывается на плотности швов при сварке в широком диапазоне режимов. На пористость влияет ширина зазора. Поэтому при сварке меди толщиной  $>3$  мм рекомендуется гарантированный зазор 0,1...0,3 мм. Весьма эффективно удается устранить пористость повторными проходами.

Сварку меди ДРПК следует вести со скоростью  $\geq 0,3$  см/с, поскольку из-за интенсивного испарения меди в вакууме возможна вогнутость сечения шва. Испарение меди при воздействии ДРПК менее интенсивное, чем при воздействии электронного луча, и поверхность шва практически гладкая.

Качество швов существенно зависит от подготовки кромок и марки меди. Например, при сварке меди марок МБ и М1 толщиной 4 мм в нижнем положении при  $I = 180$  А,  $v_{cb} = 0,7$  см/с,  $l = 1$  см при одинаковой геометрии швов медь М1 более склонна к пористости. Наличие в меди и особенно в ее сплавах легкопарящихся примесей и добавок существенно затрудняет высококачественное формирование швов ДРПК в вакууме.

При оптимальном подборе режимов сварки ДРПК швы, как правило, получаются вакуумно-плотными, беспористыми, без трещин. Размер зерна при сварке ДРПК в вакууме несколько меньше, чем при аргонодуговой сварке, а пластичность металла шва, полученного в вакууме, больше.

#### 11.3.3.8. ГАЗОВАЯ СВАРКА

При единичном производстве и ремонтных работах рекомендуется использовать газовую сварку, в процессе которой осуществляются подогрев и начальная термическая обработка изделия. Высокая теплопроводность меди обуславливает применение пламени большой мощности, примерно в 2 раза превышающей мощность для сварки малоуглеродистой стали.

Газовая горелка – тепловой источник малой сосредоточенности, поэтому для сварки меди желательно использовать ацетилено-кислородную сварку, обеспечивающую наибольшую температуру ядра пламени. Для металла малых толщин (до 3...4 мм) мощность пламени выбирается из расчета 150...175 л/ч ацетилена на 1 мм толщины, а при толщинах металла до

8...10 мм – исходя из 175...225 л/ч на 1 мм толщины. При больших толщинах рекомендуется применять две горелки: одну для подогрева, а другую для образования сварочной ванны. Сварка должна проводиться только в один проход с максимальной скоростью во избежание роста зерен и образования пор.

Для сварки меди и бронз используют нормальное пламя:  $\beta = O_2/C_2H_2 = 1,05\dots1,10$ , а для сварки латуней  $\beta = 1,3\dots1,4$  (с целью уменьшения выгорания цинка).

Раскисление металла сварочной ванны, несмотря на защиту от окружающей среды продуктами сгорания, проводится извлечением закиси меди флюсами или введением раскислителей через присадочную проволоку.

Сварочные флюсы для меди содержат соединения бора (борная кислота, борный ангидрид, бура), которые растворяют закись меди, образуя легкоплавкую эвтектику, и выводят ее в шлак. Кроме соединений бора флюсы могут

содержать фосфаты и галиды. Флюсы наносят на зачищенные и обезжиренные свариваемые кромки по 10...12 мм на сторону. Дополнительно их можно вносить с помощью присадочного металла, на который наносят покрытие из компонентов флюса и жидкого стекла с добавками древесного угля [10...20 % (мас.)]. При сварке алюминиевых бронз в состав флюса надо вводить фториды и хлориды, растворяющие  $Al_2O_3$ , получаемый при окислении алюминия в составе бронзы.

При сварке меди толщиной до 3 мм кромки не разделяют, в качестве присадочной проволоки используют медь М1 или М2, так как она не успевает существенно окислиться. При больших толщинах применяют присадочную проволоку, легированную раскислителями: до 0,2 % Р и 0,15...0,3 % Si. В зависимости от толщины свариваемого металла рекомендуются следующие диаметры присадочной проволоки:

Толщина металла, мм .....	1,5	1,5...2,5	2,5...4	4...8	8...15	15
Диаметр присадки, мм .....	1,5	2	3	4...5	6	8

Присадку в процессе сварки нельзя держать в сварочной ванне, так как это приводит к дополнительному отводу теплоты и охлаждению ванны. Присадочную проволоку расплавляют обычно второй зоной пламени.

При сварке медных сплавов, содержащих активные раскислители (алюминий, кремний, марганец), можно использовать присадку, совпадающую с составом основного металла. При сварке латуней следует применять кремнистую латунь ЛК80-3.

Медь больших толщин сваривают в вертикальном положении. После сварки осуществляют проковку в подогретом состоянии (до 300...400 °C) с последующим отжигом. При проковке получается мелкозернистая структура шва и повышаются его пластические свойства. При правильно выполненной сварке и последующей проковке сварные швы имеют прочность  $\sigma_b = 166\dots215$  МПа и угол загиба 120...180°. При сварке латуни Л62 с присадкой ЛК62-0,5 швы получаются плотными, со следующими механическими свойствами:  $\sigma_b = 385\dots390$  МПа и угол загиба 170...180°.

#### 11.3.3.8. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Она применяется для сварки меди больших толщин: 30...55 мм. Легирование шва осуществляют, применяя пластинчатые элек-

троды соответствующего состава. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления меди, используют легкоплавкие флюсы системы  $NaF - LiF - CaF_2$ , которые обеспечивают: устойчивый процесс, подогрев и плавление кромок на требуемую глубину, хорошее формирование шва и легкое удаление шлаковой корки. Особенностью режимов ЭШС меди являются повышенные сварочные токи:  $I = 800\dots1000$  А,  $U = 40\dots50$  В, скорость подачи пластинчатого электрода 12...15 м/ч. Механические свойства металла шва мало отличаются от свойств основного металла:  $\sigma_b = 190\dots197$  МПа,  $\delta = 46\dots47$  %,  $KCU = 1560\dots1570$  кДж/м<sup>2</sup>,  $\alpha = 180^\circ$ .

**Другие способы сварки.** Медь, как металл высокой пластичности, хорошо сваривается всеми видами сварки термомеханического класса, кроме контактной, так как медь характеризуется малым переходным электрическим сопротивлением. Для приварки выводов из тонких медных проволок в изделиях электронной техники используют термокомпрессионную сварку. Для более крупных изделий сложной конфигурации широко применяют диффузионную сварку в вакууме, позволяющую получать соединения меди не только с медью, но и с другими металлами и даже неметаллическими материалами.

Холодную сварку меди пластической деформацией сдвига или сдавливания используют для сварки медных шин в энергетических установках. В этом случае обеспечивается удовлетворительное электрическое сопротивление сварных соединений.

## 11.4. СВАРКА ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

### 11.4.1. СПЛАВЫ ТИТАНА И ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ

Титан относится к четвертой группе периодической системы элементов. Его атомный номер 22, относительная атомная масса 47,9,  $T_{\text{пл}} = 1668^{\circ}\text{C}$ . Он имеет аллотропические модификации: высокотемпературную  $\beta$ -Ti с объемно-центрированной кубической решеткой и низкотемпературную  $\alpha$ -Ti с гексагональной плотноупакованной. Температура полиморфного превращения титана  $\alpha \leftrightarrow \beta$  в равновесных условиях  $882,5^{\circ}\text{C}$ . Плотность  $\alpha$ -Ti ( $4,506\ldots 4,56\text{ г/см}^3$ ) выше плотности  $\beta$ -Ti ( $4,471\text{ г/см}^3$  при  $400^{\circ}\text{C}$ ), поэтому превращение высокотемпературной фазы в низкотемпературную  $\alpha \rightarrow \beta$  сопровождается в отличие от сталей уменьшением объема ( $\sim 0,13\%$ ) и не дает достаточно сильного внутрифазного наклена.

Легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана (температуру превращения, растворимость, стабилизацию той или иной фазы) могут быть разделены на следующие группы:  $\alpha$ -стабилизаторы;  $\beta$ -стабилизаторы; нейтральные упрочнители (цирконий, гафний, олово), мало влияющие на температуру полиморфного превращения (рис. 11.1).

$\alpha$ -стабилизаторы повышают температуру  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения (см. рис. 11.1, а), значительно растворяются в  $\alpha$ -фазе и не очень в  $\beta$ -фазе. Алюминий, стабилизирующий  $\alpha$ -фазу, является основным легирующим элементом

для титана благодаря дешевизне, малой плотности, эффективному упрочнению как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -фазы, повышению жаропрочности титановых сплавов. За пределами растворимости ( $7,5\%$  в  $\alpha$ -фазе) алюминий образует с титаном хрупкое интерметаллидное соединение  $\text{Ti}_3\text{Al}$ .

$\beta$ -стабилизаторы делятся на две основные группы: изоморфные, неограниченно растворяющиеся в  $\beta$ -фазе (ванадий, tantal, молибден, вольфрам, ниобий), и эвтектоидообразующие, обладающие большей, но ограниченной растворимостью в  $\beta$ -фазе, чем в  $\alpha$ -фазе. К их числу относятся (в порядке повышения температуры эвтектоидного превращения и жаропрочности) марганец, железо, хром, кобальт, никель, медь, кремний, а также свинец, бериллий, золото, серебро и др. При определенных концентрациях и температурных условиях эвтектоидообразующие  $\beta$ -стабилизаторы образуют с титаном интерметаллидные соединения вследствие эвтектоидного превращения, при котором  $\beta$ -фаза распадается на  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы. По интенсивности стабилизации  $\beta$ -фазы элементы можно расположить в следующем порядке: железо, марганец, хром, молибден, ванадий, ниобий, tantal. При содержании в титане  $\beta$ -стабилизирующих элементов больше критического (%) 12 Mo; 15 V; 8 Cr; 4 Mn; 6,5 Fe –  $\beta$ -фаза может быть зафиксирована при  $20^{\circ}\text{C}$ .

В зависимости от содержания  $\alpha$ -стабилизаторов ( $A$ ),  $\beta$ -изоморфных ( $B_i$ ) и эвтектоидных ( $B_3$ ) стабилизаторов и нейтральных упрочнителей ( $N$ ) типы титановых сплавов сводятся к следующим:  $\text{Ti} - A$ ;  $\text{Ti} - A - N$ ;  $\text{Ti} - A - B_3$ ;  $\text{Ti} - A - B_i$ ;  $\text{Ti} - A - B_3 - B_i$ ;  $\text{Ti} - A - B_3 - N$ ;  $\text{Ti} - A - B_i - B_3 - N$ . В зависимости от структуры в нормализованном состоянии титановые сплавы подразделяют на такие классы (табл. 11.18):  $\alpha$ -сплавы;  $(\alpha + \beta)$ -сплавы;  $\beta$ -сплавы, структуры которых представлены соответственно  $\alpha$ -фазой;  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами; механически стабильной  $\beta$ -фазой.

Кроме этого, выделяются два переходных класса: псевдо  $\alpha$ -сплавы, структура которых состоит из  $\alpha$ -фазы и небольшого количества  $\beta$ -фазы ( $\leq 5\%$ ); псевдо  $\beta$ -сплавы, структура которых представлена метастабильной  $\beta$ -фазой и небольшим количеством  $\alpha$ -фазы.  $\alpha$ -сплавы могут быть термически неупрочняемые и упрочняемые вследствие дисперсионного твердения;  $(\alpha + \beta)$ -сплавы – твердеющие или мягкие

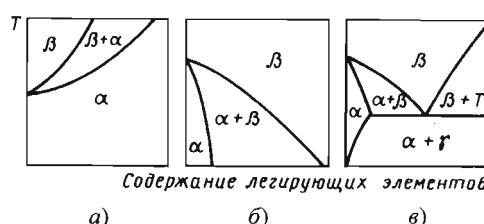


Рис. 11.1. Схема влияния легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана и структурные диаграммы

**11.18. Номинальный состав промышленных титановых сплавов  
(по типу структуры в отожженном состоянии)**

Тип сплава	$K_{\beta}$	Марка сплава	Средний химический состав (массовая доля, %)
$\alpha$ -сплавы	–	BT1-00	Нелегированный титан
		BT1-0	То же
		ПТ1М	» »
		ПТ7М	2 Al + 2 Zr
		BT5	5 Al
		BT5-1	5 Al + 2,5 Sn
Псевдо $\alpha$ -сплавы	До 0,25	4200	До 0,5 Pd
		ПТ3В	4,5 Al + 1,7 V
		OT4-0	0,8 Al + 0,8 Mn
		OT4-1	1,5 Al + 1,0 Mn
		OT4	3,5 Al + 1,5 Mn
		BT4	5,0 Al + 1,5 Mn
		OT4-2	6,0 Al + 1,5 Mn
		AT2	2,0 Al + 1,0 Mo
		AT3	3,0 Al + 1,5 (Fe, Cr, Si, B)
		AT4	4,0 Al + 1,5 (Fe, Cr, Si, B)
		AT6	6,0 Al + 1,5 (Fe, Cr, Si, B)
		AT8	7,0 Al + 1,5 (Fe, Cr, Si, B)
		OT4-0У	1,0 Al + 1,0 V + до 0,9 Fe
		OT4-1У	2,0 Al + 2,0 V + до 0,9 Fe
		OT4-У	4,0 Al + 2,5 V + до 0,9 Fe
		BT4-У	5,0 Al + 2,5 V + до 0,9 Fe
		OT4-2У	6,0 Al + 2,5 V + до 0,9 Fe
		BT20	6,0 Al + 2,5 Zr + 1,0 Mo + 1,0 V
		TC5	5,0 Al + 2,0 Zr + 3,0 Sn + 2,0 V
		BT25	6,8 Al + 2,0 Mo + 1,7 Zr + 2,0 Sn + 0,7 W + 0,2 Si
$(\alpha + \beta)$ -сплавы марテンситного типа	0,3...0,9	BT6C	5,0 Al + 4,0 V
		BT6	6,0 Al + 4,5 V
		BT3-1	6,0 Al + 2,5 Mo + 2,0 Cr + 0,3 Si + 0,5 Fe
		BT8	6,5 Al + 3,5 Mo + 0,3 Si
		BT9	6,5 Al + 3,3 Mo + 1,5 Zr + 0,25 Si
		BT14	4,5 Al + 3,0 Mo + 1,0 V
		BT16	2,5 Al + 5,0 Mo + 5,0 V
		BT23	5,5 Al + 2,0 Mo + 4,5 V + 1,0 Cr + 0,7 Fe
$(\alpha + \beta)$ -сплавы переходного типа	1,0...1,4	BT22	5,0 Al + 5,0 Mo + 5,0 V + 1,0 Cr + 1,0 Fe
		BT30	11,0 Mo + 6,0 V + 4,0 Zr
$\beta$ -сплавы	2,5...3,0	4201	33,0 Mo
Псевдо $\beta$ -сплавы	1,6...2,4	BT15	3,0 Al + 7,0 Mo + 11,0 Cr
		TC6	3,0 Al + 5,0 Mo + 6,0 V + 11,0 Cr
		BT32	2,5 Al + 8,5 Mo + 8,5 V + 1,2 Fe + 1,2 Cr

**Примечание.**  $K_{\beta}$  – отношение содержания  $\beta$ -стабилизатора в рассматриваемом сплаве к его содержанию в двойном сплаве критического состава (т.е. к минимальному содержанию  $\beta$ -стабилизатора в сплаве, который может закаливаться на 100 %  $\beta$ -фазы).

после закалки;  $\beta$ -сплавы могут быть с  $\beta$ -фазой, механически стабильной, механически нестабильной и термодинамически стабильной.

По гарантированной прочности титановые сплавы подразделяют на: малопрочные высокопластичные с  $\sigma_b < 700$  МПа; среднепрочные с  $\sigma_b < 750\ldots1000$  МПа; высокопрочные с  $\sigma_b > 1000$  МПа.

Применяют деформируемые и литейные сплавы. В табл. 11.18 представлены деформируемые сплавы, используемые для сварных конструкций. Разрабатываются новые сплавы со специальными свойствами (жаропрочные, хладостойкие, коррозионно-стойкие) на основе комплексного легирования. Например, из серии  $\alpha$ -сплавов типа СТ, имеющих высокую жаропрочность, специальными свойствами обладают сплавы типа ИРМ.

Механические свойства и структура титана и его сплавов зависят от примесей, которые разделяются на две группы: внедрения –  $O_2$ ,  $N_2$ , С, являющиеся  $\alpha$ -стабилизаторами, и  $H_2$  –  $\beta$ -стабилизатор; замещения – Fe, Si (для титана). Влияние примесей внедрения значительно сильнее. Кислород снижает пластические свойства в области малых концентраций (до 0,1 %); в интервале концентраций 0,1…0,5 % он относительно мало влияет на изменение пластичности, но при больших содержаниях (>0,7 %) титан полностью теряет способность к пластическому деформированию. Азот охрупчивает титан в еще большей степени, при содержании его >0,2 % наступает хрупкое разрушение. Углерод влияет в меньшей степени, чем кислород и азот. Водород – вредная примесь в титановых сплавах. Растворимость водорода в титане при эвтектоидной температуре составляет 0,18 %, но с понижением температуры резко падает (<0,0007 %), что приводит к выделению вторичных гидридов, преимущественно по плоскостям скольжения и двойникования. Хрупкость, низкая прочность, пластинчатая форма гидридов и значительный положительный объемный эффект при образовании гидридов (~15,5 %) – причины резкого охрупчивания титана при наводороживании.

Массовая доля примесей в сплавах титана допускается в следующих пределах, в %: <0,15…0,20  $O_2$ ; <0,05  $N_2$ ; <0,006…0,01  $H_2$ ; <0,1 С; <0,25…0,30 Fe; <0,15 Si; сумма прочих примесей ≤0,3 %. Допустимое содержание примесей в техническом титане несколько меньше.

Пластичность с сохранением высокой прочности повышают технологическими приемами, например электромагнитным перемешиванием расплава и применением колеблющегося электронного луча, что измельчает структуру  $\alpha$ -фазы и уменьшает внутризеренную неоднородность. Необходимые свойства сварных соединений термоупрочняемых ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов получают после закалки и старения.

При сварке титановых сплавов у сварных соединений наблюдается склонность к замедленному разрушению, причиной которого является повышенное содержание водорода в сварном соединении в сочетании с растягивающими напряжениями первого рода (остаточными сварочными и от внешней нагрузки). Влияние водорода на склонность к трещинообразованию возрастает при увеличении содержания других примесей (кислорода и азота) и вследствие общего снижения пластичности при образовании хрупких фаз в процессе охлаждения и старения. Отрицательное влияние водорода при трещинообразовании – результат гидридного превращения и адсорбционного эффекта снижения прочности. Наибольшее влияние водород оказывает на  $\alpha$ -сплавы в связи с ничтожной растворимостью в них водорода (<0,001 %). Растворимость водорода в  $\beta$ -фазе значительно выше, поэтому сплавы, содержащие  $\beta$ -фазу, менее чувствительны к водородному охрупчиванию; вместе с тем повышенная растворимость водорода в  $\beta$ -фазе увеличивает опасность наводороживания. Склонность к растрескиванию увеличивается при: повышенном содержании водорода в исходном материале; насыщении водородом в процессе сварки (из-за недостаточно тщательной подготовки сварочных материалов, свариваемых кромок и т.д.); насыщении водородом в ходе технологической обработки сварных соединений и эксплуатации.

Радикальными мерами по борьбе с трещинообразованием являются:

- снижение газов в основном и присадочном материалах, в %: <0,008  $H_2$ ; <0,1…0,12  $O_2$ ; <0,004  $N_2$ ; применение правильной технологии сварки для предотвращения попадания паров воды и вредных газов в зону сварки (тщательная подготовка и зачистка сварочных материалов и свариваемого металла, надежная защита металла в зоне сварки и рациональный подбор

режимов сварки); для уменьшения склонности к замедленному разрушению целесообразно  $\alpha$ - и псевдо  $\alpha$ -сплавы титана сваривать на жестких режимах; ( $\alpha + \beta$ )-сплавы – на относительно мягких (скорость охлаждения 10...20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ );

- снятие остаточных сварочных напряжений;

- предотвращение возможности наводороживания сварных соединений при эксплуатации путем выбора сплавов рациональной композиции для работы в средах, где возможно насыщение водородом.

Поры в сварных соединениях, которые чаще располагаются в виде цепочки по зоне сплавления, снижают статическую и динамическую прочность сварных соединений. Их образование может вызываться попаданием водорода вместе с адсорбированной влагой на присадочной проволоке, флюсе, кромках свариваемых изделий или из атмосферы при нарушении защиты. Перераспределение водорода в зоне сварки в результате термодиффузионных процессов при сварке также может привести к пористости. Растворимость водорода в титане уменьшается с повышением температуры. Поэтому в процессе сварки титана водород диффундирует от зон максимальных температур в менее нагретые области, от шва – к основному металлу. Важнейшими мерами борьбы с порами, вызванными водородом при высококачественном исходном материале, является тщательная подготовка сварочных материалов, в частности прокалка флюса, применение защитного газа гарантированного качества, вакуумная дегазация и зачистка перед сваркой сварочной проволоки и свариваемых кромок (удаление альфированного слоя травлением и механической обработкой, снятие адсорбированного слоя перед сваркой щетками или шабером, обезжикивание), соблюдение защиты и технологии сварки. В сварном шве поры могут образоваться вследствие: задержания пузырьков инертного газа кристаллизующимся металлом сварочной ванны при сварке титана в среде защитных газов; «захлопывания» микрообъемов газовой фазы, локализованных на кромках стыка, при совместном деформировании кромок в процессе сварки; химических реакций между поверхностными загрязнениями и влагой и т.д.

При сварке титана плавлением требуются концентрированные источники теплоты. Одна-

ко в связи с более низким, чем у стали, коэффициентом теплопроводности (в 4 раза), более высоким электрическим сопротивлением (в 5 раз) и меньшей теплоемкостью для сварки плавлением титана тратится меньше энергии, чем для сварки углеродистых сталей. Из-за низких коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и модуля упругости остаточные напряжения в сварных соединениях титана меньше предела текучести и составляют для большинства титановых сплавов (0,6...0,8) $\sigma_{0,2}$  основного металла. Наиболее высокие остаточные напряжения возникают в сварных соединениях однофазных как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -титановых сплавов или у слабо гетерогенизованных сплавов такого типа.

Высокий коэффициент поверхностного натяжения титана в сочетании с малой вязкостью в расплавленном состоянии увеличивает опасность прожогов и вызывает необходимость более тщательной сборки деталей под сварку по сравнению с деталями из сталей.

Критерии свариваемости сплавов титана:

- наиболее высокая (среди тугоплавких металлов) химическая активность по отношению к кислороду, азоту, водороду, с которыми металлы соединяются непосредственно при повышенных температурах с образованием устойчивых соединений, вызывающих резкое охрупчивание металла; оксиды и нитриды устойчивы при низких и высоких температурах; температура плавления оксидов титана 1820  $^{\circ}\text{C}$ , нитридов – 3205  $^{\circ}\text{C}$ , гидриды устойчивы при низких температурах, но при 700...800  $^{\circ}\text{C}$  разлагаются, что существенно изменяет растворимость водорода;

- высокая чувствительность к термическому циклу сварки, связанная с полиморфным  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращением, резким ростом зерна высокотемпературной  $\beta$ -фазы при нагреве выше температуры полиморфного превращения, перегревом и образованием хрупких фаз при охлаждении и старении;

- характерная особенность чистых металлов – высокая сопротивляемость горячим трещинам при сварке, главным образом в связи с малым температурным интервалом хрупкости, а также теплофизическими свойствами при повышенных температурах, а вместе с тем склонность к замедленному разрушению вследствие водородного охрупчивания при наличии растягивающих напряжений первого рода; это явление резко интенсифицируется

при наличии дополнительных охрупчивающих факторов: повышенном содержании примесей, неблагоприятных структурах, жестком напряженном состоянии;

– значительная анизотропия свойств в сварных соединениях в связи с тем, что низкотемпературная  $\alpha$ -модификация имеет гексагональную плотноупакованную решетку, для которой характерно это явление.

Основная проблема свариваемости титановых сплавов – получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты и чувствительности металла к термическому циклу сварки. Заметное насыщение металла шва кислородом, азотом и водородом в процессе сварки происходит при температурах  $\geq 350^{\circ}\text{C}$ . Это резко снижает пластичность и длительную прочность сварных конструкций. Поэтому зона сварки, ограниченная изотермой  $\geq 350^{\circ}\text{C}$ , должна быть тщательно защищена от взаимодействия с воздухом, в среде инертных защитных газов (аргона или гелия) высокой чистоты под специальными флюсами, в вакууме. Сварка без защиты возможна при способах сварки давлением, когда благодаря высокой скорости процесса и вытеснению продуктов окисления при давлении (контактная сварка) или отсутствии высокого нагрева (ультразвуковая сварка) опасность активного взаимодействия металла в зоне сварки с воздухом сводится к минимуму.

При сварке в сплавах титана происходят сложные фазовые и структурные превращения. Чувствительность к сварочному термическому циклу выражается: в протекании полиморфного превращения  $\alpha \leftrightarrow \beta$ ; резком росте размеров зерна  $\beta$ -фазы и перегреве на стадии нагрева; образовании хрупких фаз при охлаждении и старении; неоднородности свойств сварных соединений, зависящих от химического и фазового состава сплавов. Вследствие низкой теплопроводности и малой объемной теплоемкости титана время пребывания металла при высоких температурах значительно больше, чем для стали, что является причиной перегрева, резкого увеличения размера зерен  $\beta$ -фазы и снижения пластичности титана. Превращение  $\beta \rightarrow \alpha$  в зависимости от состава сплава и температурно-временных условий сварки может сопровождаться возникновением стабильной  $\alpha$ -и метастабильных  $\alpha'$ - $\alpha''$ - $\alpha_m$  $\omega$ - $\beta$ -фаз, а также  $\gamma$ -фазы.  $\alpha'$ -фаза характеризуется зака-

лочной игольчатой структурной мартенситного типа с искаженной гексагональной решеткой. Она образуется в низколегированных  $\alpha$ -сплавах титана при быстром охлаждении, а также при пластической деформации метастабильной  $\beta$ -фазы.  $\alpha''$ -фаза представляет собой мартенситную фазу. Она пластична, твердость ее меньше, чем твердость  $\alpha$ -фазы. В связи с малым объемным эффектом мартенситного превращения  $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -фазы в титане значительно более пластичны и менее хрупки, чем в сталях, что является благоприятным фактором при сварке.  $\omega$ -фаза – метастабильная промежуточная низкотемпературная модификация титана, она наиболее сильно охрупчивает, упрочняет и снижает пластичность титана. Эвтектоидный распад  $\beta$ -фазы в титановых сплавах может приводить к столь резкому ухудшению механических свойств и охрупчиванию, что их практическое применение исключается.

Основной критерий выбора технологии сварки, исходя из оптимальных механических свойств, – оптимальный интервал скоростей охлаждения  $\Delta\omega_{\text{охл}}$ , в котором степень снижения уровня пластических свойств ОШЗ оказывается наименьшей. Поэтому сварку  $\alpha$ - и псевдо  $\alpha$ -сплавов целесообразно проводить при минимальных погонных энергиях;  $(\alpha + \beta)$ -сплавы со средним количеством  $\beta$ -фазы характеризуются резким снижением пластических свойств в широком интервале скоростей охлаждения вследствие неблагоприятного сочетания  $\alpha'$ ,  $\omega$ - и  $\beta$ -фаз. Вне этого интервала пластичность увеличивается при малых скоростях в результате уменьшения количества  $\beta$ -фазы, при высоких – за счет ее увеличения. Эти сплавы целесообразно сваривать на мягких режимах с малыми скоростями охлаждения.

Высоколегированные  $(\alpha + \beta)$ -сплавы с высоким содержанием  $\beta$ -фазы (ВТ16) или сплавы со структурой метастабильной  $\beta$ -фазы целесообразно сваривать на режимах, обеспечивающих среднюю и высокую скорости охлаждения.

#### 11.4.2. ПОДГОТОВКА ПОД СВАРКУ

Качество сварных соединений во многом определяется технологией подготовки кромок деталей и титановых проволок под сварку. Подготовительные операции выбирают в зависимости от исходного состояния заготовки.

Плоские листовые заготовки, нарезанные ножницами, детали простой формы, изготовленные холодной штамповкой и т.п., подготавливаются под сварку механической обработкой кромок (пятый-шестой классы чистоты).

Свариваемые детали разрезают механическим путем. В качестве предварительного метода разрезки с последующей механической обработкой кромок может быть использована также газовая и плазменная резка. Газовую резку титана проводят на повышенной по сравнению со сталью скорости при одновременном снижении мощности подогревающего пламени из-за более интенсивного выделения теплоты в зоне реза. Сварные соединения, выполненные непосредственно после газовой сварки, имеют низкую пластичность и склонны к растрескиванию в условиях напряженного состояния. Удаление поверхностного слоя после газовой резки механическим путем на глубину  $\geq 1$  мм позволяет получить высококачественное сварное соединение.

Принципиально разделка кромок при сварке титановых сплавов не отличается от разделок, применяемых для сталей. В зависимости от толщины свариваемого металла сварку проводят без разделки, с V-, U-, X- и рюмо-кообразными разделками, а также применяют замковые соединения. Сварку деталей из титановых сплавов выполняют после того, как снимут газонасыщенный (альфированный) слой. Такой обработке должны быть подвергнуты детали, изготовленные пластической деформацией (поковки, штамповки и т.д.), а также детали, прошедшие термическую обработку в печах без защитной атмосферы.

Удаление альфированного слоя с применением травителей предусматривает:

- предварительное рыхление альфированного слоя дробе- или пескоструйной обработкой;

- травление в растворе, содержащем (в %): 40 HF, 40 HNO<sub>3</sub>, 20 H<sub>2</sub>O или 50 HF и 50 H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>; увеличение времени травления выше оптимального приводит к взрыхлению поверхностных слоев металла, повышенной сорбции ингредиентов среды и увеличению порообразования при сварке;

- последующую зачистку кромок на участке шириной 10...15 мм с каждой стороны металлическими щетками или шаберами для удаления тонкого слоя металла, насыщенного водородом при травлении (табл. 11.19).

Механическое удаление альфированного слоя (зачистка шабером) непосредственно перед сваркой обеспечивает лучшие результаты. Перед началом сборочно-сварочных работ необходимо очистить детали от загрязнений металлической щеткой и обезжирить органическим растворителем. В качестве органических растворителей можно использовать ацетон и бензин. Рекомендуется следующая технология обезжиривания: промывка свариваемых кромок и прилегающих к ним поверхностей на ширину  $\geq 20$  мм (бязью, капроновыми или волосяными щетками) бензином марки Б-70 и последующая промывка этиловым спиртом-ректификатом; допускается промывка ацетоном.

При сборке конструкций из титана под сварку необходимо соблюдать следующие особенности:

- в связи с жидкотекучестью и высоким коэффициентом поверхностного натяжения расплавленного титана обеспечивать более высокое качество сборки;

### 11.19. Составы некоторых растворов для химической обработки поверхности деталей из титана перед сваркой

Назначение раствора	Состав	Продолжительность травления
Разрыхление оксидной пленки	150...250 г/л нитрита натрия, 500...700 г/л углекислого натрия	$\geq 2$ ч
Травление	220...300 мл/л плавиковой кислоты (плотность 1,13 г/см <sup>3</sup> ), 480...550 мл/л азотной кислоты (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ), $T \leq 25$ °C	1...2,0 ч
Осветление	600...750 мл/л азотной кислоты (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ), 85...100 мл/л плавиковой кислоты (плотность 1,13 г/см <sup>3</sup> )	3...10 мин

- исключить правку и подгонку деталей с использованием местного нагрева газовым пламенем;
- учитывать трудность правки и подготовки деталей в холодном состоянии в связи со значительной пружинистостью титана;
- надежно защищать швы при сварке плавлением от доступа воздуха с обратной стороны шва при выполнении прихваток.

В качестве присадочных материалов при сварке титана плавлением используют холоднотянутую проволоку и прутки, изготовленные из листового металла. Выбор сварочной проволоки определяется условиями сварки и эксплуатации конструкции. Состав проволоки должен быть близок к составу основного металла. Сварочную проволоку из титана и его сплавов изготавливают диаметром 0,8...7 мм. Ее подвергают вакуумному отжигу.

При соблюдении рассмотренных требований к качеству исходного материала, подготовке под сварку, технологии сварки свариваемость сплавов титана можно характеризовать следующим образом. Высокопластичные малопрочные титановые сплавы ( $\sigma_b < 700$  МПа ОТ4-0, ОТ4-1, АТ2, а также технический титан ВТ1-0, ВТ0-1) обладают хорошей свариваемостью всеми приемлемыми для титана видами сварки; прочность и пластичность сварных соединений близка к прочности и пластичности основного металла.

Свариваемость титановых сплавов средней прочности ( $\sigma_b < 750...1000$  МПа) различна. Сплавы ОТ4, ВТ5, ВТ5-1, 4201 ( $\beta$ -сплав) хорошо свариваются различными методами; механические свойства сварных соединений также близки к механическим свойствам основного металла. Сплавы АТ3, ВТ4, АТ4, СТ5, ВТ20, ОТ4-2 отличаются хорошей свариваемостью, однако прочность и пластичность сварных соединений снижаются на 5...10 % по сравнению с прочностью и пластичностью основного металла. Сплав ВТ6С обладает удовлетворительной свариваемостью при сварке плавлением и контактной сварке. Предел прочности сварного соединения, выполненного сваркой плавлением,  $\geq 90$  % предела прочности основного металла.

Большинство высокопрочных сплавов характеризуются удовлетворительной свариваемостью. Сплавы ВТ16, ВТ23, ВТ15, ТС6 предназначены для применения в термически упрочненном состоянии, сплавы ВТ6, ВТ14,

ВТ3-1 и ВТ22 – как в термически упрочненном, так и в отожженном состоянии. Оptимальные свойства сварных соединений достигаются после термической обработки.

Для титана и его сплавов, а также сварных соединений применяют в основном следующие виды термической обработки: отжиг, закалку и старение. В конструкциях титановые сплавы можно использовать в состояниях после прокатки, отжига или упрочняющей термической обработки. Упрочнение титановых сплавов термической обработкой достигается в отличие от сплавов на основе железа преимущественно дисперсионным твердением и старением.

Отжиг заключается в нагреве до определенных температур, выдержке и охлаждении на воздухе для стабильных сплавов и с печью для высоколегированных. Режимы отжига приведены в табл. 11.20. Время выдержки при указанных температурах зависит от толщины обрабатываемых деталей. Для листов рекомендуют следующую выдержку:

Толщина					
листа, мм ...	$\leq 1,5$	$1,6...2,0$	$3,1...6,0$	6	
Время вы- держки, мин	15	20	25	60	

Время выдержки при неполном отжиге (отпуске) 20...60 мин.

Термически стабильные сплавы (титан,  $\alpha$ - и псевдо  $\alpha$ -сплавы) и их сварные соединения подвергают отжигу первого рода (до температур выше температуры рекристаллизации сплава) для снятия остаточных сварочных напряжений (500...600 °C, выдержка 0,5...1 ч) и правки тонкостенных конструкций, которые для этой цели выдерживают в жестких приспособлениях при 600...650 °C в течение 0,5...1 ч.

Отжиг ( $\alpha + \beta$ )-сплавов и их сварных соединений сочетает элементы отжига первого рода, основанного на рекристаллизационных процессах, и отжига второго рода, базирующегося на фазовой перекристаллизации. Для этих сплавов кроме простого применяют рекристаллизационный отжиг. Он заключается: в нагреве сплава при сравнительно высоких температурах, достаточных для прохождения рекристаллизационных процессов, охлаждении до температур, обеспечивающих высокую стабильность  $\beta$ -фазы (ниже температуры рекристаллизации), и выдержке при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе.

**11.20. Температуры полиморфного превращения, рекристаллизации, отжига и снятия остаточных сварочных напряжений (полного отжига) промышленных титановых сплавов**

Марка сплавов	Температура, °C					
	полиморфного превращения	рекристаллизации		отжига листов	снятия остаточных напряжений в сварных конструкциях (неполный отжиг)	
		Начало	Конец			
BT1-00	885...890	580	670	520...540	445...485	
BT1-0	885...900	600	700			
BT5	930...980	750	850	--	550...600	
BT5-1	950...990	680	950	700...750		
OT4-0	860...930		800	590...610	480...520	
OT4-1	910...950	720	840	640...660	520...560	
OT4	920...960	760	860	660...680	545...595	
BT4	960...1000	780	900	690...710	550...650	
OT4-2	990...1050	800	930	710...730	600...650	
BT20			950	700...800		
AT2	870...910	-	-	600...650	430...560	
AT3	990...1000			800...850	545...585	
AT4	950...1020			850...870	600...650	
TC5	970...1020			760...780		
BT6C	950...990	850	950	750...800	550...600	
BT6	980...1010				550...650	
BT14	920...960	900	930	740...760	520...650	
BT16	840...880	820	840	730...770		
BT22		800	825	740...760	550...650	
BT15	750...800	500	770	790...810		
TC6	770...810	-	-			
BT23	880...930		740...760			

При упрочняющей термической обработке ( $\alpha + \beta$ )-сплавов и метастабильных  $\beta$ -сплавов перед сваркой их основной металл подвергают закалке или отжигу, а после сварки — закалке и старению. При расположении швов в месте утолщения возможны следующие варианты последовательности операций сварки и термической обработки: закалка — старение —

сварка — местный отжиг; закалка — сварка — старение.

Для титана и его сплавов применяют следующие способы сварки: дуговую в инертных газах, электронно-лучевую, плазменную, автоматическую под флюсом, электрошлаковую, высокочастотную, контактную, диффузионную, холодную, взрывом, прокаткой биметаллов.

### 11.4.3. ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

В промышленности применяют автоматическую, механизированную и ручную сварку неплавящимся электродом, непрерывно горящей и импульсной дугой и автоматическую и механизированную сварку плавящимся электродом. Для сварки титана могут быть использованы стандартное сварочное оборудование, снабженное дополнительными устройствами для защиты зоны сварки, а также специализированные сварочные горелки и установки.

Из дуговых способов сварки титана самым распространенным является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах. Этот способ наиболее универсален, так как позволяет осуществлять сварку в различных пространственных положениях, в стесненных условиях, а также быстро переналаживать оборудование при изменении типа соединения и толщины свариваемого металла.

Качество сварных соединений определяется главным образом надежностью защиты зоны сварки и чистотой инертного газа. Для защиты зоны дуги и расплавленной ванны необходимо использовать аргон высшего сорта (табл. 11.21). Для защиты остывающей части шва и обратной стороны шва неответственных изделий допускается использование аргона второго сорта. Гелий и его смеси с аргоном целесообразно применять при дуговой сварке плавящимся электродом больших толщин (8...10 мм). При сварке в гелии необходимый для защиты сварочной ванны расход газа в 2–3 раза больше, напряжение на дуге в 1,4–1,0 раза выше, а ширина зоны расплавления в 1,4 больше, чем при сварке в аргоне.

В связи с высокой химической активностью титана при повышенных температурах и особенно в расплавленном состоянии основной трудностью при его сварке плавлением является обеспечение надежной защиты от атмосферы не только сварочной ванны и корня шва, но и остигающих участков сварного соединения, нагретых до  $\geq 350$  °С, т.е. до тех температур, при которых начинается заметное взаимодействие титана с газами атмосферы.

В зависимости от конфигурации и размеров свариваемых узлов применяют три типа защиты зоны сварки инертным газом: общую защиту узла в камере с контролируемой атмосферой; защиту только сварного соединения с использованием местных камер; струйную защиту зоны сварки, осуществляющую непрерывным обдувом сварочной ванны и остигающих участков соединения перемещением сопла с удлиненной насадкой (рис. 11.2 – 11.5).

Камеры с контролируемой атмосферой обеспечивают наиболее надежную и стабильную защиту не только зоны сварки, остигающих участков шва и ЗТВ, но и обратной стороны (корня) шва. Поэтому применение таких камер особенно целесообразно в серийном производстве в том случае, когда конструкция имеет сложную конфигурацию, а швы располагаются в труднодоступных местах.

Сварку в камерах выполняют вручную и в автоматическом режиме. При этом сварщик может находиться как вне камеры, так и в ней в специальном скафандре. В последнем случае так называемые обитаемые камеры снабжаются сложными системами жизнеобеспечения сварщика, шлюзами для входа и выхода операторов и подачи деталей, аппаратурой для регенерации инертного газа и анализа его состава.

### 11.21. Химический состав инертных газов

Газ	Основной продукт, об. %, не менее	Объемная доля примесей, %, не более					Содержание влаги, г/м <sup>3</sup> , не более
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
Аргон:							
– первого сорта	99,98	0,003	0,01	–	–	–	0,03
– высшего сорта	99,992	0,0007	0,006	–	–	–	0,007
– высокой чистоты	99,997	0,0002	0,002	0,0002	0,00005	0,0001	0,002
Гелий очищенный марки Б	99,99	0,002	0,004	0,0025	0,001	0,003	0,015

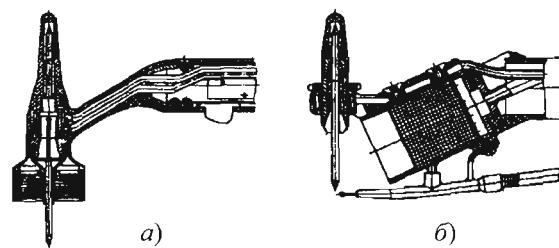


Рис. 11.2. Схемы горелок для ручной (а) и механизированной (б) сварки

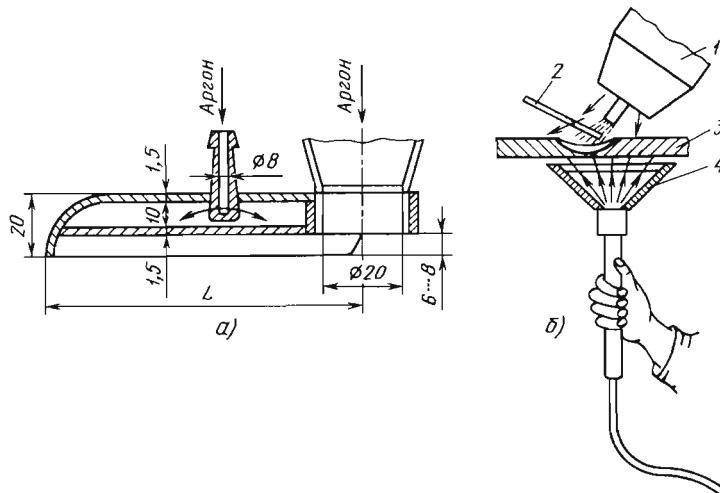


Рис. 11.3. Продольный разрез защитной приставки колпака (а) и простейшая схема защиты обратной стороны шва при ручной аргонодуговой сварке (б):

1 – сопло горелки; 2 – присадочная проволока; 3 – изделие;  
4 – приспособление для защиты обратной стороны соединения

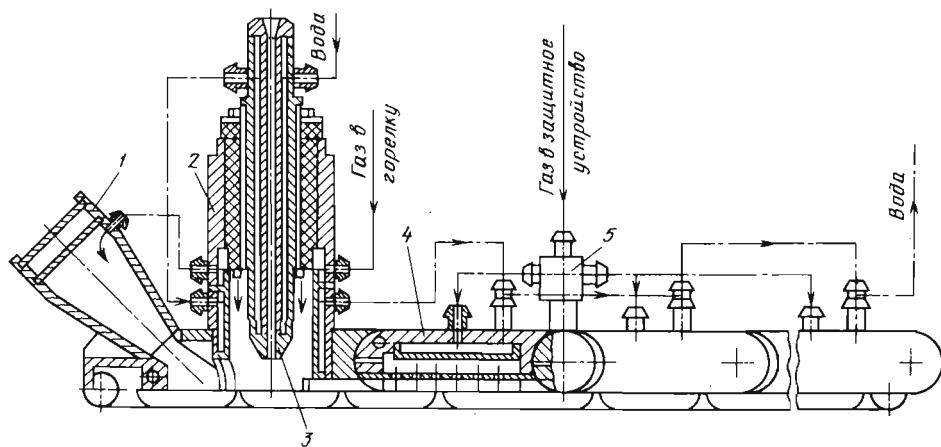
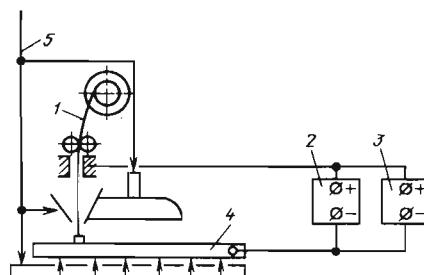


Рис. 11.4. Схема горелки для автоматической сварки листов титана плавящимся электродом:

1 – смотровое устройство; 2 – корпус горелки; 3 – мундштук;  
4 – секционное защитное приспособление гусеничного типа; 5 – распределитель газа



**Рис. 11.5. Схема процесса импульсно-дуговой сварки титана плавящимся электродом в инертных газах:**

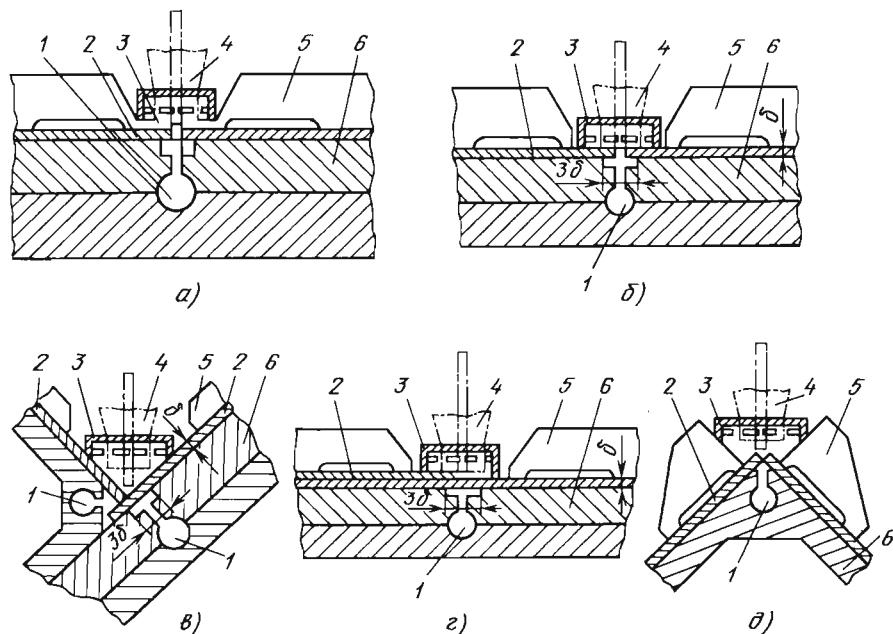
1 – электрод; 2 – источник питания;  
3 – генератор импульсов; 4 – свариваемое изделие;  
5 – подача защитного газа

Камеру с размещенными в ней изделиями, подлежащими сварке, вакуумируют (разрежение  $<133 \cdot 10^{-3}$  Па), а затем заполняют инертным газом. Давление аргона в камере может быть нормальным и пониженным, что значительно сокращает его расход. При наличии примесей в атмосфере камеры не выше их

содержания в аргоне высшего сорта обеспечиваются необходимые пластичность, прочность и коррозионная стойкость металла сварных соединений.

Местные защитные камеры используют с вакуумированием и без предварительного вакуумирования. В последнем случае для вытеснения воздуха и высококачественной защиты необходима продувка камеры пяти-десятикратным объемом инертного газа. Улучшение условий защиты металла, нагревенного до температур активного поглощения газов, достигается применением мер, обеспечивающих интенсивный теплоотвод из зоны сварки (médные водоохлаждаемые подкладки и накладки, охлаждающие ванны) и предупреждающих контакт нагретой поверхности с воздухом: подкладки, покрытия и т.д. (рис. 11.6).

Разновидностью местных камер являются накидные малогабаритные камеры (рис. 11.7). Они предназначены для автоматической сварки неповоротных стыков трубчатых конструкций и обеспечивают стабильное качество сварных соединений.



**Рис. 11.6. Схемы защиты лицевой и обратной сторон соединения при механизированной аргонодуговой сварке титана и его сплавов; соединения:**

а – стыковое листов большой толщины ( $>3$  мм); б – стыковое листов малой толщины (до 3 мм); в – тавровое; г – нахлесточное; д – угловое; 1 – канал для аргона, сообщающийся с канавкой в подкладке; 2 – свариваемые листы титана; 3 – защитная приставка; 4 – сопло сварочной горелки; 5 – прижимы приспособлений; 6 – приспособления

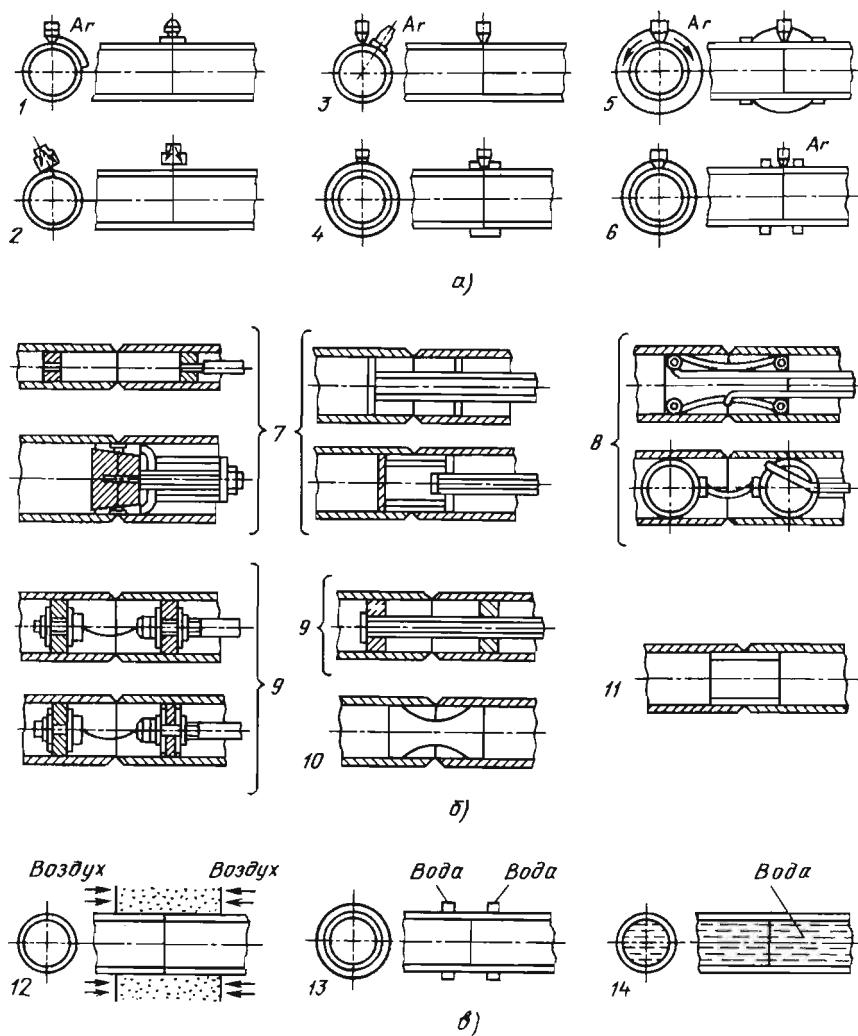


Рис. 11.7. Конструктивные схемы защиты при аргонодуговой сварке труб из титана и других активных металлов:

а – защита наружной стороны стыка; б – защита обратной стороны шва при сварке стыков;  
 в – дополнительные способы улучшения защиты; 1 – газозащитная приставка;

2 – горелка с уширенным ламинарным потоком; 3 – горелка с дополнительным поддувом;

4 – дополнительная микрокамера; 5 – эластичная камера; 6 – боковой поддув;

7, 8 и 9 – соответственно жесткие, мягкие и полужесткие устройства; 10 – защитные карманы;

11 – специальные покрытия; 12 – ограждения палаточного типа; 13 – охлаждение кольцевыми накладками;

14 – охлаждение проточной водой или распылением с внутренней стороны шва

Наибольшее распространение получила сварка неплавящимся электродом на воздухе, хотя надежно защитить зону сварки инертным газом в этом случае достаточно сложно. Для этого разработаны специальные горелки, насадки, подкладки и другие приспособления.

Аргонодуговую сварку непрерывно горящей дугой проводят на постоянном токе прямой полярности от стандартных источников питания. При толщине металла до 3...4 мм сварку выполняют за один проход, при большей толщине требуется многопроходная свар-

ка (табл. 11.22 – 11.29). Увеличение глубины проплавления и производительности сварки достигается сваркой проникающей (заглубленной) дугой при ее принудительном погружении ниже поверхности свариваемых кромок. Таким способом можно сваривать металлы толщиной до 10 мм без разделки кромок и присадочного металла. Применение фтористых флюсов при аргонодуговой сварке титановых сплавов позволяет снизить погонную энергию по сравнению

с аргонодуговой сваркой без флюса, сушить ЗТВ, уменьшить пористость швов и улучшить условия защиты металла от взаимодействия с воздухом. Используются флюсы систем АНТ, фтористые соединения щелочных и щелочно-земельных металлов. Флюс разводят этиловым спиртом до получения жидкой пасты (30 г флюса и 100 г спирта), которую наносят на кромки свариваемых деталей. Сварку проводят после улетучивания спирта.

### 11.22. Ориентировочные режимы ручной сварки

$b$ , мм	Число проходов	$I_{\text{св}}$ , А	$U_d$ , В	$d_{\text{пр}}$ , мм
1	1	40...60	10...14	1,2...1,5
2		70...90		
3	2	120...130	10...15	1,5...2,0
4		130...140		
5	2...3	140...160	11...15	2,0...2,5
10	10...14	160...200		2,0...3,0

Условные обозначения:  $d_{\text{пр}}$  – диаметр сварочной проволоки;  $U_d$  – напряжение на дуге;  $b$  – толщина металла;  $I_{\text{св}}$  – сварочный ток.

### 11.23. Ориентировочные режимы автоматической сварки

$b$ , мм	Число проходов	$I_{\text{св}}$ , А	$U_d$ , В	$v_{\text{св}}$ , м/ч	$d_{\text{пр}}$ , мм	$v_{\text{под}}^*$ , м/ч	Расход газа $Q$ , л/мин					
							в горелку	в насадку	для защиты обратной стороны шва			
1	1	60...80	8...10	25...30	—	—	5...7	5...8	1...2			
2		120...160		20...25			8...10	10...13	3...4			
3		200...240	10...12	15...20			12...15	14...18	4...5			
5		180...210	9...11	10...13			14...16	16...20	4...6 5...8			
6	2...3	200...240	13...15	13...15	2,5	60...80						
		180...210	10...12	10...15	2,5	120...180						
		220...250	11...13									
8	1	190...240	10...12	6...10	2,5	50...100						
		240...290	11...13			15...18						

\*  $v_{\text{под}}$  – скорость подачи сварочной проволоки.

Примечание. При сварке листов большей толщины следует увеличить число проходов.

### 11.24. Ориентировочные режимы автоматической сварки сквозным проплавлением

$b$ , мм	$I_{\text{св}}$ , А	$U_{\text{св}}$ , В
5	340	30,0
6	300	16,0
7	330	15,6
8	390	15,0
12	405	9,0

**11.25. Ориентировочные режимы автоматической сварки погруженной дугой**

<i>b</i> , мм	<i>I<sub>cb</sub></i> , А	<i>U<sub>d</sub></i> , В	<i>v<sub>cb</sub></i> , м/ч	Ширина зазора в стыке, мм	Число проходов
4	210...250	12...14 13...15	15...20	0...0,3	1...2
7	320...350		12...14	0...0,5	
8...10	340...380		10...12		
13...15	450...500		7...8	0...0,7	
23...24	800...850	15...16	13...15	0...1,0	1...3

**11.26. Ориентировочные режимы автоматической сварки неплавящимся электродом импульсной дугой в среде аргона стыковых соединений без разделки кромок**

Способ сварки	<i>b</i> , мм	<i>v<sub>cb</sub></i> , м/ч	<i>I<sub>cb</sub></i> , А	<i>U<sub>d</sub></i> , В	$\tau_i$ , с	$\tau_p$ , с
Односторонняя	0,5	10...15	30...50	8...9	0,15...0,20	0,15...0,20
	1,0	10...25	70...130	6...10	0,12...0,20	0,10...0,20
	1,5	10...15	90...120	10...12	0,15...0,20	0,15...0,20
	2,0		160...200			
Двусторонняя	1,5	12...24	85...135	6...8	0,12...0,22	0,10...0,12
	2,0		130...175		0,16...0,38	0,10...0,14
	3,0	24	250	10	0,16	0,12
Погруженной дугой	2,0	—	300	—	0,15	5
	2,5		320		0,17	

Условные обозначения:  $\tau_i$  – продолжительность импульса сварочного тока;  $\tau_p$  – продолжительность паузы.

**11.27. Режимы плазменной сварки титана**

<i>b</i> , мм	<i>I<sub>cb</sub></i> , А	<i>U<sub>d</sub></i> , В	<i>v<sub>cb</sub></i> , м/ч	Расход газа <i>Q<sub>г</sub></i> , л/мин		
				плазмообразующего	защитного	на поддув
2	120...140	22...23	30...40	2...2,2	1,5...2,0	3,5...4,0
6	245	23	14	5,7	9,4	—
10	380	28	15	3,4	10,5	42
12...15	450	28...30	10...16	6...10	6...12	—

**11.28. Ориентировочные режимы сварки титана плавящимся электродом в инертных газах**

<i>b</i> , мм	<i>d<sub>3</sub></i> , мм	<i>I<sub>cb</sub></i> , А	<i>U<sub>d</sub></i> , В	<i>v<sub>cb</sub></i> , м/ч	Вылет электродной проволоки, мм	<i>Q<sub>г</sub></i> , л/мин
3...8	1,6	350...450	28...36/22...28	25...40	20...25	30...40/20...30
10...12	1,6...2	440...520	38...40/30...34	20...35	20...28	70...90/35...45
15	3	600...650	42...48/30...32	25...30	25...30	70...100/35...50
16...36	5	780...1200	46...52/34...38	15...25	40...55	100...120/50...60

\*  $d_3$  – диаметр электрода.

Примечание. В числителе приведены режимы сварки в гелии; в знаменателе – то же, в аргоне.

**11.29. Режимы механизированной импульсно-дуговой сварки титановых сплавов плавящимся электродом диаметром 1,2 мм ( $I_d = 40...45$  А,  $Q_r = 15...18$  л/мин)**

Тип таврового соединения	$b$ , мм	Катет шва, мм	$I_{cb}$ , А	$U_d$ , В	$v_{cb}$ , м/ч	Область применения
С разделкой кромок	4...9	4...7	60...70	27...32	34...40	В конструкциях с полным проваром корня шва
	10...16		90...100	30...32	20...30	
	18...46					
Без разделки кромок	3	3...4	60...80	27...32	30...35	В конструкциях с неполным проваром корня шва, работающих на статическую нагрузку при растяжении и на вибрационную при изгибе
	4...8	5...6				
	9...10	6...7				

Для тонколистового металла ( $\leq 2,5$  мм) целесообразно применять импульсную сварку без присадочной проволоки. Разработана плазменная сварка листов титана малой (0,025...0,5 мм) и средней (0,5...12,5 мм) толщин и многослойная сварка плоских листов (толщиной  $> 12$  мм). По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом плазменная характеризуется более высокой производительностью, меньшим короблением (деформация на 1/2...1/3 меньше). Механические свойства титана при плазменной сварке близки к свойствам, полученным при аргонодуговой сварке. Основной трудностью при плазменной

сварке по сравнению с аргонодуговой являются более жесткие требования к качеству сборки в связи с характерным грибообразным проплавлением. Процесс сварки тонколистового металла лучше осуществлять внутри микрокамер. Благодаря этому обеспечивается надежная защита зоны сварки при малом расходе инертного газа. При высоком качестве основного и присадочного материалов, соблюдении условий защиты и оптимальных режимах сварки вольфрамовым электродом механические свойства сварных соединений титана и его сплавов близки к свойствам основного металла (табл. 11.30).

**11.30. Механические свойства сварных соединений из титановых сплавов толщиной 2...3 мм, выполненных неплавящимся электродом без присадки**

Марка сплава	$\sigma_b$ , МПа	$\alpha_s$ , °	$\delta$ , %	КСУ, кДж/м³
BT1-0	<u>460</u> 411,6	—	<u>27</u> 33	<u>2165</u> 2195
AT2	<u>647,5</u> 696,5	<u>120</u> 100	<u>21</u> 16,5	<u>1205</u> 1087
OT4	<u>824</u> 804	<u>72</u> 58	<u>14,4</u> 14,3	<u>803</u> 490
AT3	<u>699,5</u> 664,1	<u>100</u> 86	<u>16</u> 16	<u>1323</u> 1274
AT6	<u>989</u> 1087	—	<u>12,5</u> 8,7	<u>372,4</u> 372,4
BT5-1	<u>824</u> 820	<u>44</u> 50	<u>10,5</u> 12,5	<u>392</u> 597,8
TC5	<u>1012</u> 989,8	—	<u>12,0</u> 12,5	<u>597</u> 627,2

**Примечание.** В числителе – свойства сплавов, в знаменателе – свойства металла шва.

Сварку плавящимся электродом в инертных газах применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной  $>4$  мм в нижнем положении. Сварку следует проводить при обратной полярности на режимах, гарантирующих струйный перенос металла. При сварке в аргоне меньше разбрызгивание металла, больше глубина проплавления, меньше ширина шва и площадь проплавления, чем при сварке в гелии. Однако форма зоны проплавления при свалке в гелии более благоприятна, чем в аргоне. Лучшее формирование шва и стабильность процесса достигаются при использовании смеси из 80 % Не и 20 % Ar. При механизированной сварке применяют проволоку диаметром до 2 мм. В процессе автоматизированной сварки стыковых и угловых соединений используют проволоку диаметром 2...5 мм. Способы защиты, материалы, приборы, сварочная оснастка в основном те же, что и при сварке вольфрамовым электродом.

#### 11.4.4. СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Основным преимуществом сварки титана под флюсом является высокая производительность процесса. Этим способом можно выполнить стыковые, угловые и нахлесточные швы при толщине металла  $\geq 3$  мм. Защиту обратной стороны шва осуществляют применением остающейся флюсомедной подкладки или флюсовой подушки. Сварку можно проводить с использованием стандартной сварочной аппаратуры; ток постоянный обратной полярности. Применяют бескислородные флюсы АНТ-1; АНТ-3, АНТ-5, АНТ-7 системы  $\text{CaF}_2 - \text{BCl}_2 - \text{NaF}$ . Флюс перед употреблением необходимо высушить при  $200\ldots 300$  °C. Содержание влаги во флюсе не должно превышать 0,05 %. Высота слоя флюса должна быть не меньше вылета электрода. Вылет электродной проволоки следует ограничивать более строго, чем при дуговой сварке в инертных газах, во избежание перегрева проволоки, загрязнения металла шва газами и ухудшения стабильности процесса. Режимы сварки приведены в табл. 11.31. Для автоматической сварки титана больших толщин ( $>15$  мм) рекомендуются сварка на более высоких плотностях тока и двухдуговая сварка.

В связи с особыми физико-химическими свойствами титановой электродной проволоки к полуавтоматам для сварки титана предъявляют следующие требования:

#### 11.31. Технологические параметры автоматической сварки под флюсом

$d_3$ , мм	$I_{\text{св max}}$ , А	$j$ , А/мм <sup>2</sup>	$K_{\text{напл}}$ , г/(А·ч)	$h_{\text{пр}}$ , мм
2,5	620	126,5	16,00	11,3
3,0	650	92,0	15,50	11,0
4,0	850	67,7	14,50	12,0
5,0	950	48,4	14,00	11,0

Условные обозначения:  $j$  – плотность сварочного тока;  $K_{\text{напл}}$  – коэффициент наплавки;  $h_{\text{пр}}$  – глубина проплавления.

- конструкция наконечника должна обеспечить стабильность токопровода на незначительном вылете;
- из-за сравнительно высокой жесткости титановой проволоки необходим небольшой изгиб направляющей трубки держателя;
- исходя из высокого коэффициента трения титана целесообразно применять более мощные подающие механизмы. Для механизированной сварки титана используют полуавтоматы толкающего (А-732) и тянувшего (ПШЛ-10) типов.

Автоматическая и механизированная сварка под флюсом позволяют получать высокие свойства сварных соединений и металла шва (табл. 11.32). Автоматическую сварку под флюсом осуществляют сварочной проволокой диаметром 2,5; 3,0; 4,0 и 5 мм. Применение проволок большего диаметра затруднено вследствие их повышенной жесткости. Для сварки технического титана ВТ1-00 и ВТ1-0 и низколегированных сплавов ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1, ВТ5, ВТ5-1, 4200 используют сварочную проволоку марок ВТ1-00 и ВТ1-00св. Для сварки средне- и высоколегированных сплавов (например, ВТ6С, ВТ14, ВТ20 и др.) применяют проволоки марок СПЛ2, ВТ20св и др. Сплавы типа ПТ-3В, ПТ-7М рекомендуется сваривать проволокой СП-2В. Использование этих проволок при автоматической сварке под флюсом обеспечивает получение сварных соединений с оптимальным сочетанием прочностных и пластических характеристик и с надежной работоспособностью в сложных условиях эксплуатации.

Удовлетворительное формирование выпуклости сварного шва при автоматической сварке обеспечивается при соблюдении следующих требований, предъявляемых к флюсу:

### 11.32. Механические свойства металла шва, выполненного автоматической сваркой под флюсом АНТ-7 (сплав ОТ4)

$b$ , мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a_h$ , Дж/см <sup>2</sup>
6	804/727	870/813	17,5/15,9	37,5/34,1	102/67
10	790/712	851/793	15,3/14,6	33,4/31,6	91/59

**Примечание.** В числителе приведены данные для ОМ, в знаменателе для металла шва.

химический и гранулометрический составы флюсов должны соответствовать техническим требованиям, оговоренным техническими условиями на их изготовление; содержание пылевидной фракции во флюсе не должно превышать 15 %. Сформировать металл шва под флюсом сер. АНТ можно в относительно узком диапазоне оптимальных режимов сварки. При автоматической сварке под флюсом на повышенных токах (>600...700 А) получение швов с удовлетворительным качеством формирования поверхности затруднительно. Поэтому для соединения металла средних и больших толщин целесообразно применять двустороннюю сварку. При невозможности ее выполнения следует отдать предпочтение многослойной сварке в разделку кромок на малых токах. Сварку продольных швов на металле небольшой толщины (3...6 мм), а также многослойные швы на металле средней толщины рекомендуется выполнять на малых токах под флюсом АНТ-1. Для сварки колыцевых швов малой толщины на титане и всех однопроходных швов средней толщины применяется флюс АНТ-3. Флюсы АНТ-5 и АНТ-7 предназначены для соединения металла больших толщин при сварке на токах >700 А.

**Электрошлаковой сваркой (ЭШС) титана** соединяют заготовки (поковки) и детали толщиной >40 мм. Сварку проводят пластинча-

тым электродом [плотность тока 2,0...2,5 А/мм<sup>2</sup>; напряжение 13...17 В; толщина электродов (поковка, прокат) 9...18 мм; глубина шлаковой ванны 20...30 мм; зазор между кромками 24...28 мм], электродными проволоками (диаметром 3...5 мм) и плавящимся мундштуком. Используют специализированную (сварочные головки А-977, А-1494, устройство А-1022 и др.) и стандартную аппаратуру, переоборудованную применительно к сварке титана. Расплавленные основной и присадочный металлы защищают тугоплавкими фторидными флюсами типов АНТ-2, АНТ-4, АНТ-6 и дополнительно аргоном высшего сорта. Сварку проводят переменным током с минимальной погонной энергией, обеспечивающей устойчивый электрошлаковый процесс и необходимое проплавление свариваемых кромок. Используют источники типов ТПК-1000-3, ТПК-3000-1, ТПК-3000-3 с жесткой вольт-амперной характеристикой. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 11.33 и 11.34.

Механические свойства сварных соединений близки к свойствам основного металла. Недостаток сварки – получение крупнозернистой макро- и микроструктуры, понижающей пластические свойства. Улучшают свойства термической обработкой. Техника и технология сварки сплавов принципиально не отличаются от сварки технического титана.

### 11.33. Режимы ЭШС титановыми проволочными электродами диаметром 5 мм

$b$ , мм	$U$ , В	$I$ , А	$n_s$ , шт.	$Q_{Ar}$ , л/мин
50	26...28	900...1200	1	40
80	28...30	1500...1900		50
100	30...32	2000...2600	2	55
150	32...34	2600...3000		60

**Примечание.** Сухой вылет электрода 50 мм, зазор между кромками 30...32 мм, глубина шлаковой ванны 30...40 мм, расстояние от крайних электродов до боковой поверхности свариваемых кромок 10...11 мм.

**11.34. Ориентировочные режимы ЭШС титановым плавящимся мундштуком**

$b_{\text{om}}$ , мм	$U_{\text{cb}}$ , В	$b_{\text{ш}}$ , мм	$n_3$ , шт.	$v_3$ , м/ч	$V_{\text{cb}}$ , м/ч	$I_{\text{cb}}$ , А	$Q_{\text{Ar}}$ , л/мин
100	19	15	1	120	1,2	2510	25
110			2	85	1,4	2980	
200	20	16		160	1,6	4760	35
220				105	1,5	5430	40
250	21	16		130	1,6	6210	
300				150		7590	45
350	22	18		120	1,7	9260	50
400			4	145		10 970	55

Условные обозначения:  $b_{\text{ш}}$  – зазор между кромками;  $n_3$  – число электродов;  $v_3$  – скорость подачи электродов.

ЭШС проволочными электродами проводят одной или двумя электродными проволоками (см. рис. 11.8, а). Этим способом можно сваривать металл толщиной 30...110 мм при использовании электрода диаметром 5 мм. Применение электродной проволоки большего диаметра, чем при сварке сталей аналогичных толщин, вызвано прежде всего повышенной электропроводимостью бескислородных галогенидных флюсов и, как следствие, пониженным напряжением сварки, а также высоким удельным электросопротивлением титана, препятствующим применению режимов сварки с большими плотностями тока в электродах.

ЭШС плавящимся мундштуком (рис. 11.8, б) применяют для выполнения прямо- и криволинейных швов на металле большой толщины. Как и в случае сварки титана проволочным электродом, диаметры сварочных проволок и толщины плавящихся мундштуков должны быть больше, чем для сварки стали.

ЭШС пластинчатым электродом (электродом большего сечения) выполняют чаще всего одной, реже несколькими пластинами подключенными к одному источнику питания (см. рис. 11.8, в), и используют при сварке металла толщиной до 350 мм. При этом высота шва может достигать 600 мм. Высокое удельное электросопротивление титана обуславливает обязательное применение скользящего токоподвода на установке А-550 при выполнении ЭШС этим способом.

**Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) титана** обеспечивает наилучшие условия защиты металла от газов. Высокая концентрация тепловой энергии позволяет вести сварку на высоких скоростях при малой энергоемкости процесса и получать сварные соединения титана с малой шириной шва и ЗТВ. Металл шва имеет мелкозернистую структуру. Необходимым условием получения высококачественных сварных соединений является точная сборка под сварку. Режимы ЭЛС титана зависят от типа используемой электронной пушки, технологической оснастки, толщины металла, конфигурации и размеров изделия.

Рекомендуемые режимы ЭЛС стыковых соединений из сплавов ВТ20, ВТ22, ВТ23 толщиной 8...15 мм в нижнем положении на остающейся массивной технологической подкладке:  $U = 30$  кВ;  $I_{\text{cb}} = 110\ldots180$  мА,  $V_{\text{cb}} = 25\ldots35$  м/ч.

**Дуговую сварку в вакууме** можно применять для сварки титана толщиной 2...60 мм проволоками диаметром 1,5...5,0 мм. Сварку плавящимся электродом проводят на постоян-

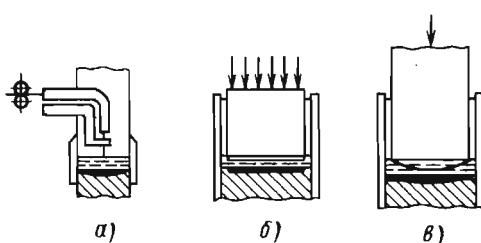


Рис. 11.8. Схемы ЭШС проволочными электродами (а), плавящимся мундштуком (б) и пластинчатым электродом (в)

ном токе обратной полярности специализированными сварочными головками в вакуумных камерах. Основным преимуществом вакуумно-дуговой сварки является повышение пластичности сварных соединений по сравнению с полученными другими методами сварки и с основным металлом. Это объясняется дополнительной очисткой при сварке и уменьшением в нем газов и неметаллических включений при расплавлении металла в вакууме. По этой же причине несколько уменьшены пределы прочности и текучести металла шва. Примерный режим сварки титана толщиной 50 мм с V-образной разделкой электродом диаметром 3 мм при поперечных колебаниях: сварочный ток 380...400 А; напряжение дуги 29...30 В; скорость сварки 15 м/ч; число проходов 6; вакуум при сварке  $<133 \cdot 10^{-3}$  Па.

Сварка в вакууме полым неплавящимся электродом (полым катодом) отличается высокой концентрацией энергии и по проплавляющей способности занимает промежуточное положение между плазменной и ЭЛС. Возможность ведения процесса в глубоком вакууме ( $133 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па) позволяет получать высококачественную защиту сварочной ванны и сваривать титан, цирконий, ниобий, tantal, молибден и их сплавы.

**Контактная сварка** обеспечивает получение высококачественных сварных соединений титановых сплавов при соблюдении технологии. Рекомендуемая подготовка свариваемых участков: удаление загрязнений ацетоном, протирка ветошью, обработка в травителе (состава типа 30 %  $\text{HNO}_3$ , 3 % HF, 67 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ ),

промывка в воде  $\geq 5$  мин, обезжиривание, обезвоживание ацетоном и протирка. В случае точечной сварки защита инертным газом не требуется благодаря плотному контакту и сжатию свариваемых деталей. Однако для шовной сварки и стыковой сопротивлением необходима дополнительная защита аргоном первого сорта. Благодаря высокому электрическому сопротивлению и малой теплопроводности титана контактная сварка последнего значительно облегчается и может выполняться на различных машинах средней мощности одно- и трехфазного переменного или постоянного тока. Титан по сравнению со сталью менее чувствителен к силе на электродах и их геометрическим параметрам. Низкая электропроводность титановых сплавов облегчает возможность многоэлектродной сварки. Параметры режима сварки чистого титана близки к параметрам режимов, используемых для коррозионно-стойких сталей. Ориентировочные режимы контактной сварки приведены в табл. 11.35 – 11.37.

**Диффузионная сварка титана.** Титан и его сплавы диффузионной сваркой соединяются достаточно легко. Температуру сварки выбирают в диапазоне 800...900 °C, т.е. в области температуры рекристаллизации, и составляющую ( $0,7\dots0,8$ ) $T_{\text{пл}}$ . Учитывая низкий предел текучести титана и значительное влияние на него температуры, давление сжатия принимают в пределах 0,98...9,8 МПа. В зависимости от температуры и давления сжатия время сварки составляет от нескольких секунд до нескольких десятков минут.

### 11.35. Ориентировочные режимы контактной точечной сварки титана

Толщина листов, мм	Радиус сферы электродов, мм ( $\pm 10\%$ )	Сварочный ток, кА	Время сварки, с ( $\pm 10\%$ )	Сила на электродах, кН	Диаметр ядра точки, мм	Максимальная прочность, кН
0,8 + 0,8	50	5,0...6,0	0,15	2...2,5	4...5	6
1,0 + 1,0	75	6,0...7,0	0,20	2,5...3	5...6	7
1,2 + 1,2		6,5...7,5	0,22	3...3,5	5,5...6,5	9
1,5 + 1,5	100	8,0...8,5	0,24	4...5	6,5...7,0	11
2,0 + 2,0		9,5...10,0	0,28	5...6	7,0...8,0	15
2,5 + 2,5	150	11,0...12,0	0,35	6...7	8,0...9,0	16,5

### 11.36. Ориентировочные режимы контактной шовной сварки титана

Толщина листов, мм	Радиус сферы роликов, мм	Ширина плоских роликов, мм	Сварочный ток, кА	Длительность, с		Сила на роликах, кН	Скорость сварки, м/мин	Ширина шва, мм
				сварочного импульса	паузы			
0,8 + 0,8	60	4,5	6,0...7,0	0,10	0,18	2...2,5	0,8	3...4
1,0 + 1,0			7,0...8,0	0,12	0,25	2,5...3,5	0,7	4...5
1,2 + 1,2	75	6,5	8,0...9,0	0,16	0,30	3,5...4		5...6
1,5 + 1,5			8,5...9,0	0,20	0,40	4...5	0,6	6...6,5
2,0 + 2,0	100	7,5	11,0...12,0	0,25	0,50			7...7,5

### 11.37. Ориентировочные режимы контактной стыковой сварки титана оплавлением

Поперечное сечение, мм	Припук, мм		Сварочный ток при оплавлении, А	Время, с	
	на оплавление	на осадку		подогрева	оплавления
1000	10	8	29 500	120	3
2000				180	
2500	15	10	31 200	300	4
3000				360	
3500	15	10	33 000	420	5
4000				430	

Примечание. Сварочный ток при подогреве 22 500 А, сила при осадке 50 кН.

Значения  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{-1}$  и  $\delta$  сварных соединений такие же, как и у основного металла. Для облегчения соединения при диффузионной сварке применяют промежуточные одно- и многослойные покрытия и прокладки из более легкоплавких металлов, образующих относительно низкотемпературные эвтектики непосредственно с титаном ( $Ti - Me - Ti$ , однослойное покрытие) или между разнородными металлами ( $Ti - Me_1 - Me_2 - Ti$ ), образующими покрытие. Соединение деталей из титановых сплавов диффузионной сваркой через промежуточную медную прокладку основано на использовании медно-титановой эвтектики, образующейся в зоне контакта при 870...890 °C (ниже температуры сварки). Для улучшения механических свойств соединений после сварки следует применять изотермический отжиг, который снижа-

ет содержание меди в шве. В качестве промежуточной прокладки можно использовать медную фольгу или напыленный слой меди. Применять промежуточную прокладку целесообразно при сварке геометрически сложных титановых конструкций с поверхностями большой протяженности. При получении соединений при сварке давлением в жидкой среде в качестве теплоносителя можно использовать жидкие среды на основе расплавленных солей. При сварке титановых сплавов теплоносителем может служить смесь солей состава: 70 %  $BaCl_2$  + 30 % KCl. Оптимальные режимы сварки титановых сплавов приведены в табл. 11.38.

Сварка давлением в жидкой среде рекомендуется при изготовлении сварных изделий из титановых сплавов в мелкосерийном производстве.

**11.38. Оптимальные режимы диффузионной сварки титановых сплавов**

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$t, \text{мин}$
OT4	950	50	10
BT6		100	15

Сварка в режиме сверхпластичности по сравнению с обычной сваркой постоянным давлением с подогревом позволяет в 4 раза снизить необходимую силу, в 6 – 30 раз длительность сварки и на 50...150 °C температуру (табл. 11.39).

**11.39. Оптимальные режимы сварки в условиях сверхпластичности**

Сплавы	$T, ^\circ\text{C}$	Скорость деформации, 1/с	$t, \text{мин}$
BT6 + BT6	900	$7,5 \cdot 10^{-4}$	3,2
OT4 + OT4		$2 \cdot 10^{-3}$	1,2
OT4 + BT15	920		10

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамович В.Р., Демянцевич В.П., Ефимов Л.А. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 215 с.
2. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
3. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. И.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
4. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук и др. Киев.: Наукова думка, 1986. 240 с.
5. Неровный В.М., Ямпольский В.М. Сварочные дуговые процессы в вакууме. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
6. Сварка и свариваемые материалы. В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
7. Справочник по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич; Отв. ред. В.Н. Замков. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.
8. Стеклов О.И. Сварка тугоплавких металлов и их сплавов: Справочник / Под ред. А.И. Акулова. Т. 2. Сварка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. С. 289 – 331. 462 с.

## Г л а в а 12

# ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 12.1. СВАРИВАЕМОСТЬ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К основным особенностям тугоплавких металлов следует отнести высокие температуру плавления, прочность и жаропрочность. По уровню абсолютной и удельной прочности (отношение предела прочности к плотности) при высоких температурах тугоплавкие металлы значительно превосходят другие металлы. Весьма ценными свойствами этих металлов являются также их высокая коррозионная стойкость в жидкых щелочных металлах и кислотах, малое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов, сверхпроводимость (ниобий) и др.

На основании выполненных за последние годы исследований свариваемости таких металлов их можно условно разделить на две группы. Первую группу, куда входят удовлетворительно сваривающиеся плавлением металлы, составляют цирконий, ниобий, tantal и ванадий. Металлы второй группы – молибден, вольфрам и хром – свариваются значительно хуже. Сварные соединения этих сплавов весьма склонны к образованию трещин, малопластичны при нормальной температуре.

Сплавы на основе тугоплавких металлов, полученные методом порошковой металлургии, плохо свариваются: в швах образуются поры, сварные соединения склонны к образованию трещин. Поэтому для сварных конструкций применяют металлы и сплавы, выплавленные в контролируемой атмосфере инертных газов (дуговой метод плавки) или вакууме (электронно-лучевой метод плавки).

Уменьшение содержания вредных примесей в исходном металле – одна из основных задач металлургии химически активных тугоплавких металлов.

Хорошей свариваемостью отличаются сплавы tantalа, содержащие <13 % (ат.) легирующих элементов. Очевидно, подобное ограничение как для ниобиевых, так и для tantalовых сплавов относится к элементам, наиболее

эффективно упрочняющим твердый раствор (вольфрам, молибден). Так, например, сплав состава Ta – 30 % Nb – 7,5 % V сваривается удовлетворительно, а сплавы Ta – 12,5 % W и особенно Ta – 17 % W имеют плохую свариваемость; швы этих сплавов при комнатной температуре хрупкие, а сплав Ta – 17 % W склонен к образованию горячих трещин (ГТ) при сварке.

В ниобиевых сплавах образование ГТ зависит от соотношения концентрации легирующих элементов. Так, при отношении  $Mo/Zr > 5$ ;  $V/Zr > 5$  и  $(Mo + V)/Zr > 10$  ГТ в швах отсутствуют.

Единственный легирующий элемент, который повышает пластичность молибденовых и вольфрамовых сплавов при легировании в количестве 1 % (мас.), – рений. Наряду с ним на свариваемость вольфрамовых сплавов благоприятно влияет молибден. Увеличение в сплавах вольфрама содержания молибдена до 30 % (мас.) повышает пластичность сварных соединений.

Основным препятствием получению высококачественных сварных соединений является наличие примесей в основном металле в количествах, значительно превышающих их предел растворимости. Рост содержания кислорода в молибденовых сплавах приводит к появлению и резкому увеличению температуры перехода к вязкохрупкому сварному соединению.

Механические свойства сварных швов на тугоплавких металлах могут быть улучшены, если их легировать элементами, которые наряду с увеличением высокотемпературной прочности и пластичности при нормальной температуре уменьшают размер зерна. К таким элементам относятся алюминий, титан, цирконий, гафний, иридий, ниобий и др. Из этих элементов наиболее эффективны цирконий, гафний, иридий.

**Взаимодействие тугоплавких металлов с газами.** Тугоплавкие металлы энергично взаимодействуют с большинством газов, обра-

зя оксиды, химические соединения и растворы внедрения. Как правило, в результате взаимодействия тугоплавких металлов с газами уменьшается их пластичность.

По существующей классификации, основанной на сравнении стандартной величины теплоты образования оксида ( $\Delta H_{298K}^{\circ}$ , ккал/моль  $O_2$ ), большинство тугоплавких металлов относится к группе металлов с большим сродством к кислороду. Для этой группы металлов  $130 \text{ ккал/моль } O_2 < \Delta H_{298K}^{\circ} < 200 \text{ ккал/моль } O_2$ .

В результате взаимодействия этих металлов с кислородом чаще всего снижается их пластичность. Особенно сильно охрупчиваются молибден и вольфрам. По скорости окисления на воздухе тугоплавкие металлы могут быть расположены в такой последовательности: молибден, tantal, ниобий, вольфрам. Заметное повышение скорости окисления этих металлов наблюдается при температурах  $>600^{\circ}\text{C}$ .

До температуры  $650^{\circ}\text{C}$  на поверхности ванадия существует плотная оксидная пленка, защищающая его от дальнейшего окисления. Выше этой температуры, точнее при температуре  $650^{\circ}\text{C}$ , оксидная пленка расплывается и скорость окисления ванадия возрастает. Молибден и вольфрам образуют летучие оксиды.

В связи с окислением и испарением оксидов тугоплавких металлов для работы последних при повышенных температурах их поверхность необходимо защищать.

Тугоплавкие металлы проявляют значительную сорбционную способность к водороду. При нагреве ванадия, ниobia и tantalа в водороде наблюдается их охрупчивание вследствие выделения по границам зерен гидридов иглообразной формы, поэтому для указанных металлов водород является опасной примесью. Вольфрам и молибден адсорбируют водород без существенного ухудшения свойств.

Азот, так же как и кислород, отрицательно влияет на пластичность тугоплавких металлов. Ванадий, ниобий и tantal с азотом образуют весьма ограниченные области твердых растворов внедрения.

При взаимодействии азота с молибденом и вольфрамом область твердых растворов ограничена еще в большей степени. В молибдене и вольфраме образуются нитриды  $Mo_3N$ ,  $Mo_2N$ ,  $W_2N$  и  $WN$ , которые выделяются в основном по границам зерен, снижая пластичность ме-

талла при комнатной температуре. В то же время нитриды тугоплавких металлов способствуют их упрочнению, и поэтому для ряда сплавов, в том числе и молибденовых, нитриды используются для дисперсионного упрочнения сплавов, при этом концентрация азота в сплаве поддерживается на заданном уровне.

При температурах  $<200^{\circ}\text{C}$  цирконий не реагирует с газами атмосферного воздуха. При нагревании до  $400...600^{\circ}\text{C}$  он покрывается оксидной пленкой, затрудняющей дальнейшее окисление металла. При более высокой температуре одновременно с увеличением скорости окисления наблюдается растворение кислорода в цирконии, что сильно понижает его пластичность. При нагреве он активно соединяется с азотом, образуя нитриды. Металлический цирконий энергично поглощает водород. Скорость окисления циркония становится заметной при температуре  $200^{\circ}\text{C}$ .

Заметное взаимодействие азота с йодидным цирконием начинается при температуре  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ . В интервале температур  $400...600^{\circ}\text{C}$  реакция протекает сравнительно медленно, но при  $700...800^{\circ}\text{C}$  она развивается быстро.

Насыщение циркония азотом снижает пластические свойства металла и его коррозионную стойкость. В промышленности применяются сплавы цирконий – олово, цирконий – ниобий и др.

Цирконий и его сплавы применяются в отожженном (мягком) и нагартованном (обжиге до 50 %) состояниях.

Высокая активность циркония и его сплавов при повышенных температурах существенно сказывается на сварочных процессах, сопровождающихся изменением температуры металла шва и ОШЗ в широких пределах.

Таким образом, анализ особенностей изменения свойств сварных соединений в связи с наличием в них примесей внедрения в различных количествах позволяет наметить наиболее эффективные пути улучшения свариваемых металлов VIA подгруппы. К ним относятся: во-первых, очистка исходного материала от элементов, образующих с ним твердые растворы внедрения (особенно остро эта проблема стоит при производстве сплавов на основе вольфрама и хрома); во-вторых, рациональное легирование химически активными элементами с целью связывания примесей в термодинамически стабильные соединения.

**Пористость при сварке тугоплавких металлов.** Некоторые тугоплавкие металлы проявляют повышенную склонность к образованию пористости в металле швов.

Наибольшее количество пор возникает при стыковой сварке без зазора между кромками при неполном проплавлении по толщине металла. Количество пор в металле шва изменяется в зависимости от состава загрязнений, расположенных на торцовых поверхностях свариваемых кромок. Минимальное число пор наблюдается при электрополировании и химическом травлении торцовых поверхностей. Значительное повышение пористости происходит при зачистке кромок напильником, а также при загрязнении поверхностей продуктами, содержащими углерод и кислород. Максимальная пористость имеет место при загрязнении свариваемых кромок углеродом и кислородом одновременно.

Для устранения пор при сварке тугоплавких металлов могут быть рекомендованы следующие основные меры:

- тщательная обработка поверхности, особенно торцов соединяемых деталей (шлифование и тщательная очистка от загрязнений);
- сварка с гарантированным зазором, исключающая возможность образования замкнутых несплошностей;
- предварительный подогрев кромок и особенно торцов соединяемых деталей с целью десорбции имеющихся на них газов;
- увеличение погонной энергии и длительности существования ванны в расчете на создание условий для всплыивания пузырьков.

**Особенности кристаллизации металла шва.** Высокие температура плавления и теплопроводность большинства тугоплавких металлов способствуют повышению скорости кристаллизации и образованию в металле швов грубой крупнокристаллической дендритной структуры.

Большинство тугоплавких металлов обладает малой растворимостью примесей внедрения, при современном уровне металлургического производства в промышленных сплавах содержание таких примесей превосходит предел растворимости. В связи с этим в процессе кристаллизации примеси внедрения выделяются по границам зерен в виде различных соединений, охрупчивающих металл.

Образование грубой дендритной структуры в металле швов сокращает суммарную величину поверхности границ зерен, что приво-

дит к увеличению примесей, выделившихся по границам кристаллитов, и, как следствие, к охрупчиванию металла.

Для предупреждения трещин в металле швов, вызванных охрупчивающим влиянием выделяющихся примесей внедрения, могут быть рекомендованы различные меры:

- применение присадочных металлов, обеспечивающих получение более высокой пластичности металла шва;
- изменение схемы кристаллизации с целью наивыгоднейшего направления осей дендритов регулированием направления теплоотвода при кристаллизации;
- применение мер по ограничению остаточных напряжений в металле шва.

**Изменение структуры и свойств металла в ЗТВ.** При сварке деформированных тугоплавких металлов в ОШЗ наблюдаются рост зерна и снятие нагартовки.

Для чистых металлов, в которых количество примесей внедрения не превышает предела растворимости, в ЗТВ поникаются прочность и твердость и повышается пластичность по сравнению с подобными характеристиками основного металла в нагартованном состоянии.

В связи с тем что в промышленных сплавах количество примесей внедрения, как правило, выше предела их растворимости, пластичность рекристаллизованной зоны снижается. Это связано с повышением концентрации примесей внедрения по границам зерен. Особенно резко снижается пластичность металла при распределении неметаллических соединений в виде пленок по границам зерен, резко ослабляется связь между зернами, что приводит к хрупкому разрушению металла по границам зерен. Например, в молибдене при наличии 0,006 % O<sub>2</sub> большая часть границ зерен оказывается покрытой оксидами молибдена. Для вольфрама это содержание еще меньше.

Выделение вдоль границ зерен цепочек избыточных фаз иногда способствует возникновению несплошностей и зарождению микротрещин, повышающих склонность металла к хрупкому разрушению. С увеличением размеров зерна концентрация дефектов по границам зерен повышается, что вызывает перемещение температуры перехода к хрупкому разрушению в область более высоких температур.

На хрупкость тугоплавких металлов отрицательно влияют не только примеси внедрения, выделившиеся в виде второй фазы и расположенные по границам зерен, но и примеси

внедрения, находящиеся в пересыщенном твердом растворе. Снижение пластичности металла в этом случае происходит главным образом в результате торможения движения дислокаций.

## 12.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЦИРКОНИЯ

Цирконий – пластичный металл, обладающий хорошими свариваемостью и жидкотекучестью. Он неплохо растворяет свои оксиды, имеет низкий коэффициент линейного расширения, благодаря чему коробление его при сварке незначительно. Цирконий обладает высокой коррозионной стойкостью в кислотах, а также в воде под большим давлением и при высоких температурах.

Прочность чистого циркония 250 МПа. Более высокая прочность присуща техническому цирконию (410 МПа). Для повышения механических и коррозионных свойств цирконий легируют различными элементами. Среди применяемых легирующих элементов  $\alpha$ -стабилизатор (олово) и  $\beta$ -стабилизаторы (железо, хром, молибден, ниобий).

Прочность соединений из технического нелегированного циркония близка к таким же свойствам основного металла.

Для циркония рекомендуются следующие способы сварки: дуговая в камерах с контролируемой атмосферой инертных газов (преимущественно неплавящимся электродом), электронно-лучевая и плазменная. Эти металлы удовлетворительно свариваются контактной и диффузионной сваркой.

**Подготовка под сварку.** Чтобы исключить возможность насыщения поверхностных слоев металла водородом, следует избегать травления кромок перед сваркой. Предпочтение заслуживает механическая очистка. В отдельных случаях, при тщательном соблюдении всех требований технологических инструкций, допускается химическая очистка кромок в реагенте следующего состава [в об. долях (%)]: 30 HNO<sub>3</sub>; 5 HF; 65 H<sub>2</sub>O, продолжительность травления при 55...60 °C ≤ 2 мин. После травления заготовки переносят для осветления в ванну с раствором такого состава [в мас. долях (%)]: 15 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, 9 H<sub>2</sub>O, 85 1 н. HNO<sub>3</sub> (64 мл HNO<sub>3</sub> плотностью  $d = 1,42$  на 1 л воды). После осветления их промывают в проточной воде и просушивают при 200 °C. Непосредственно перед сваркой обязательны промывка и обез-

жиривание кромок спиртом-ректификатом или ацетоном.

**Дуговая сварка.** В камерах с контролируемой атмосферой создается предварительный вакуум  $\geq 3 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. В качестве защитного газа обычно применяется гелий или смесь [в об. долях (%)]: 73 He, 27 Ar, так как при сварке в аргоне повышается склонность швов к образованию пор. Используемый инертный газ высокой степени чистоты дополнительно очищают и осушают, пропуская его через силикагель, алюмогель и нагретую до 900...1000 °C титановую стружку. Режимы сварки циркония характеризуются повышенными сварочными токами (табл. 12.1).

Для выбора величины тока при сварке в гелии рекомендуется принимать приближенное соотношение: 1 А на 0,03 мм провара. Для вольфрамового электрода диаметром 3,2 мм оптимальные параметры режима сварки следующие:  $I_{cb} = 125\ldots135$  А;  $U_d = 14\ldots18$  В;  $v_{cb} = 10$  м/ч. При сварке на воздухе с газовой струйной защищай для металла толщиной до 12,5 мм рекомендуется такой средний расход гелия: в горелку и для защиты остывающего сварного соединения 24 л/мин, на защиту обратной стороны шва 8 л/мин. Защиту шва необходимо осуществлять при охлаждении до 370 °C. При скорости сварки до 25 м/ч ( $7,0 \cdot 10^3$  м/с) длина насадки к горелке должна быть  $\geq 27$  мм. Материал присадочной проволоки обычно соответствует составу свариваемого сплава. Часто используется проволока из сплавов типа циркаллой.

**Электронно-лучевая сварка (ЭЛС)** – один из основных технологических процессов соединения деталей из циркония и его сплавов. Сварка выполняется при давлении в вакуумной камере  $\leq 1 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Оптимальные режимы сварки (табл. 12.2) обеспечивают хорошее формирование швов без дефектов. Применяется также непрерывная и импульсная ЭЛС. Последний способ используется главным образом для сварки сплавов на основе циркония; он позволяет получать лучшее формирование швов и обеспечивает оптимальные условия для регулирования структуры соединения.

Для сварки циркониевых сплавов желательно применять системы откачки, обеспечивающие получение высокого «безмасляного» вакуума. Повышение давления в камере до  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па вызывает снижение пластичности сварных соединений.

### 12.1. Ориентировочные режимы сварки циркония и его сплавов с разделкой кромок в камере, заполненной гелием

Толщина свариваемого материала, мм	Разделка кромок	$I_{cb}$ , А	$U_d$ , В	$V_{cb}$ , м/ч ( $1 \cdot 10^{-3}$ м/с)	Число проходов
3	Однопроходная, V-образная; $\alpha = 60^\circ$ ; притупление 3 мм	70	16,5	15 (4,2)	1
6		100			2
57	Двусторонняя, рюмообразная; $\alpha = 60^\circ$ ; притупление 8 мм; $r = 8$ мм	Корень шва			32
		300	20	12...15	
		Заполнение шва			
		175	15	(3,4...4,2)	

### 12.2. Ориентировочные режимы ЭЛС технического циркония

Свариваемая толщина металла, мм	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток луча, мА	Скорость сварки, м/ч ( $1 \cdot 10^{-3}$ м/с)
1	10	60	30 (8,4)
2		100	
3	29,5	75	46,8 (13,1)
		18,5	36 (10,1)
4	20	Корень шва 50...60	10 (2,8)
		Заполнение шва 60...80*, 55...80**	

\* С присадочной проволокой диаметром 1,4...1,6 мм.

\*\* В импульсном режиме без присадки.

Часто встречающимся дефектом сварных швов циркониевых сплавов является пористость. Поры обычно располагаются вблизи линии сплавления. Пористость вызывает диффузия в сварочную ванну растворенных в металле газов, взаимодействие влаги и углеродсодержащих веществ (пары масла и др.) с расплавленным металлом. Для устранения пор и получения высококачественных соединений необходима тщательная подготовка кромок, рекомендуются прогрев отбортованных кромок расфокусированным пучком и предварительное сплавление кромок. Погонная энергия при ЭЛС циркония не превышает значений, необходимых для сварки сталей той же толщины.

Механические свойства соединений из циркония практически идентичны при сварке в камере с контролируемой атмосферой особо чистого инертного газа и ЭЛС (табл. 12.3). Прочность

сварных швов близка к прочности основного металла. Показатели пластических свойств швов заметно понижаются, оставаясь, однако, на удовлетворительном уровне. Это же наблюдается у сплавов на основе циркония (табл. 12.4).

Для устранения склонности швов к образованию холодных трещин и к замедленному разрушению, а также стабилизации качества сварных соединений сразу же после сварки их подвергают термической обработке: нагреву до 750...850 °C, выдержке в течение 40...60 мин, охлаждению с печью (технический цирконий) или в воде (сплавы циркаллой системы Zr – Nb и др.). После термической обработки сварные изделия из циркониевых сплавов (например, оболочки тепловыделяющих элементов ядерных реакторов из сплавов циркаллой-2 и циркаллой-4) обладают высокой коррозионной стойкостью.

### 12.3. Механические свойства сварных соединений из технического циркония толщиной 1,5 мм (средние показатели)

Образец	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Основной металл	284,5...333,5	33...40	48...53
Сварное соединение, выполненное в камере с контролируемой атмосферой	313,9...353,2	18...23	18...23
Соединение, выполненное ЭЛС	294,3...313,9	18...22	47...54

### 12.4. Механические свойства стыковых соединений из некоторых циркониевых сплавов (средние показатели)

Сплав	Толщина металла, мм	Основной металл		Сварное соединение	
		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Zr + 2,5 % Sn	3,2	477,7	25,0	507,2	15,0
Zr + 5 % Sn	3,2	593,5	12,0	620,0	4,0
Zr + 3 % Nb + 1 % Sn	0,9	510,1	21,0	647,5	10,0

Примечание. Сварка в камере, заполненной гелием.

**Контактная сварка.** Цирконий и его сплавы хорошо свариваются точечным и шовным способами. При точечной сварке применяют режимы для титановых сплавов с повышенной в 1,6 – 1,7 раза плотностью тока. Шовная сварка проводится с защитой аргоном. Рекомендуется также подводная сварка с погружением шва на глубину до 20 мм. Последний способ обеспечивает заметное уменьшение ширины ЗТВ. При сварке сплавов системы Zr – Nb толщиной 2 мм в воде ширина ЗТВ (с обоих сторон шва) составляет 2 мм, при защите аргоном 8 мм; твердость зоны при обоих способах защиты существенно не различается. Режим сварки сплавов толщиной 2 мм:  $I_{cb} = 15$  кА; сила на электродах 6500 Н; длительность сварки пять периодов, паузы – один период;  $v_{cb} = 50$  м/ч ( $14 \cdot 10^{-3}$  м/с), диаметр электрода 145 мм, ширина контактной поверхности 8 мм.

**Диффузионная сварка** проводится в вакууме  $\geq 1 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Рекомендуется подготовку свариваемых поверхностей выполнять по седьмому классу. Режим сварки:  $T = 750\ldots 950$  °C;  $p = 0,98$  МПа;  $t = 20$  мин. Механические свойства сварных соединений:  $\sigma_b = 581,7$  МПа;  $\delta = 20\%$ ;  $\psi = 20\%$ .

### 12.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ, ВАНАДИЯ И ТАНТАЛА

Применение ванадия и сплавов на его основе определяется: значительной удельной прочностью при умеренно высоких температурах (650...900 °C), малым сечением захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной стойкостью в сочетании с хорошей технологичностью. Недостатками являются: относительно низкая для тугоплавких металлов температура плавления (1900 °C) и чрезмерная склонность к окислению, обусловленная неустойчивостью, летучестью и низкой температурой (675 °C) плавления его оксида  $V_2O_5$ .

Ниобий и сплавы на его основе отличаются высокой температурой плавления, жаропрочностью, малым сечением захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной стойкостью, самой малой плотностью из жаропрочных металлов (вольфрам, молибден, tantal, ниобий), высокими технологичностью и свариваемостью. Недостатками ниobia и его сплавов являются большая склонность к окислению и малый модуль Юнга.

Основные преимущества сплавов на основе tantalа – высокая жаропрочность, корро-

зионная стойкость, хорошие технологичность и свариваемость. Недостатки тантала – большая плотность, сильная окисляемость при повышенных температурах, высокая стоимость.

В промышленности используют преимущественно сплавы этих металлов, упрочняемые путем упрочнения твердого раствора и образования мелкодисперсной фазы. Наиболее сильными упрочнителями для ниобия являются цирконий, гафний, вольфрам, молибден, ванадий; для тантала – ванадий, молибден, гафний, вольфрам, а также рутений, рений, осмий; для ванадия – титан, цирконий, ниобий, вольфрам. Для получения сплавов с повышенной жаропрочностью на основе ниобия и тантала в качестве легирующих элементов используют углерод, азот, бор, которые наряду с некоторым упрочнением твердого раствора образуют вторую дисперсную фазу (карбиды, нитриды, бориды), упрочняющую металл особенно эффективно при одновременном введении титана, циркония, гафния. Из рассматриваемых металлов V группы наибольшее применение имеют сплавы на основе ниобия.

Отличительными особенностями при сварке этих металлов являются высокие, как и для металлов IV группы, окисляемость, активность и чувствительность к примесям внедрения. Ниобий и tantal образуют тугоплавкие оксиды, однако температуры их плавления ниже температуры плавления металла ( $1460^{\circ}\text{C}$  для  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и  $1900^{\circ}\text{C}$  для  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ). Удельный объем оксидов значительно превышает удельный объем основного металла, поэтому оксидные пленки растрескиваются и отслаиваются, открывая доступ кислороду к поверхности металла. Оксид ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) летуч и имеет низкую температуру плавления ( $675^{\circ}\text{C}$ ); поэтому оксидная пленка не защищает металл от окисления. Окисление начинается с температур (в  $^{\circ}\text{C}$ ):  $\geq 200 \dots 250$  для ниобия;  $\geq 300$  для tantalа и  $\geq 400$  для ванадия. С азотом эти металлы взаимодействуют в меньшей степени, чем с кислородом, и устойчивы до следующих температур (в  $^{\circ}\text{C}$ ): ниобий – до  $350$ ; tantal – до  $450$ ; ванадий – до  $800$ . Нитриды представляют собой твердые тугоплавкие соединения.

Высокие температуры плавления и относительно высокая теплопроводность ниобия и tantalа вызывают необходимость применения концентрированных источников энергии при сварке плавлением. Используют следующие способы сварки: плавлением в вакууме и в инертных газах; контактную точечную и шов-

ную, диффузионную в вакууме; трением на воздухе, в инертных газах и вакууме. Из перечисленных в основном применяют сварку плавлением – электронно-лучевую и дуговую в аргоне или гелии. Кроме того, применяют контактную сварку, диффузионную и трением.

**Подготовка к сварке** должна выполняться особенно тщательно. Свариваемые кромки обрабатывают механическим способом и подвергают травлению в смесях кислот [в об. долях (%)]: ванадий –  $32 \text{ HNO}_3 + 32 \text{ HCl} + 36 \text{ H}_2\text{O}$ ; ниобий –  $22 \text{ Hf} + 8 \text{ HNO}_3 + 15 \text{ H}_2\text{SO}_4 + 55 \text{ H}_2\text{O}$ ; tantal –  $90 \text{ HF} + 10 \text{ HNO}_3$ . Непосредственно перед сваркой кромки обезжираивают и обезвоживают этиловым спиртом.

**Дуговая сварка.** Для сварки неплавящимся электродом в камерах с контролируемой атмосферой используют такое же оборудование и приспособление, как и при сварке титана. Сварку выполняют в защитной атмосфере особо высокой чистоты [в об. долях (%)]:  $1 \cdot 10^{-4} \text{ O}_2$ ;  $5 \cdot 10^{-4} \text{ N}_2$ ;  $2 \cdot 10^{-4}$  влаги. Чтобы обеспечить в камере такой состав атмосферы, применяют дополнительно очищенный и осушенный инертный газ, а также специальную технологию вакуумной подготовки камеры и ее коммуникационной системы. Подготовка камеры включает в себя вакуумирование, обезгаживание, продувку и заполнение инертным газом. Камеру откачивают до давления  $\leq 3 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Для удаления адсорбированного кислорода и паров воды с поверхностей внутри камеры рекомендуются инфракрасное облучение (от электроламп типа НИК) и промывание сверхчистым гелием. Необходима также продувка трубопроводов и вентиляй коммуникационной системы. Объем камеры заполняется очищенным газом до рабочего давления  $0,05$  ати.

В процессе сварки непрерывно следят за чистотой атмосферы. При достижении в инертном газе содержания примесей, близкого к допускаемым концентрациям, необходимо восстановить качество атмосферы. Наиболее эффективным способом восстановления сварочной атмосферы в камере и поддержания концентрации примесей меньше допустимой является непрерывная циркуляция газа через газоочистку, осуществляемая с помощью компрессора.

Для сварки используют аргон или гелий. Дополнительная очистка проводится теми же способами, что и для сварки ответственных конструкций из циркониевых сплавов (пропус-

канием через селикагель, алюмогель и разогретую титановую губку). Предпочтения заслуживает гелий, так как при сварке неплавящимся электродом в нем величины сварочных токов для проплавления тугоплавких металлов одной и той же толщины в среднем в 1,5 раза меньше, чем в аргоне. Для tantalа и его сплавов толщиной до 1 мм рекомендуется использовать аргон, для металла большей толщины – гелий или смесь аргона с гелием.

Наиболее распространенный тип сварного соединения из тугоплавких металлов –стыковое без разделки кромок. Соединения внахлестку и втавр практически не применяются. При сварке тонколистовых металлов в камере с контролируемой атмосферой на оптимальных режимах сварные швы получаются без дефектов.

При сварке на воздухе со струйной защитой наддув инертного газа необходим при остывании вплоть до 200 °C. Расход аргона для металлов толщиной 1...2 мм на защиту зоны сварки и остающихся участков соединений составляет 16 л/мин, на защиту обратной стороны шва – 5 л/мин.

Ванадий, tantal и ниобий можно сваривать на постоянном и переменном токе вольфрамовым или плавящимся электродом. Лучшие результаты получаются при сварке вольфрамовым электродом постоянным током прямой полярности.

Ориентировочные режимы аргонодуговой сварки приведены в табл. 12.5.

При стыковой сварке без присадочного материала листов толщиной 0,3...2,0 мм зазор встыке должен быть ≥15 % толщины.

Сварка циркония, tantalа и ниobia может проводиться с местной защитой в герметических камерах с контролируемой атмосферой.

При сварке в микрокамере для предупреждения подсоса воздуха аргон или гелий должен подаваться с минимальной скоростью, обеспечивающей заполнение камеры с незначительным избыточным давлением. Обратная сторона шва защищается струей инертного газа, который подводится к металлу шва через отверстия технологической подкладки. Размеры микрокамеры подбираются из расчета защиты инертным газом металла, нагреваемого до температуры >400 °C.

## 12.5. Ориентировочные режимы аргонодуговой сварки ванадия, tantalа и ниobia

Вид сварки	Толщина металла, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Длина дуги, мм	Режим сварки		Расход газа, л/мин		
					$I_{cb}$ , А	$v_{cb}, 1 \cdot 10^{-3}$ , м/с	в горелку	для корня шва	
Ручная, с присадкой; на медной подкладке	1,5	1,2	3	–	50	–	7,5	2,3	
	2,0				60				
	3,0				100				
Автоматическая, без присадки, с передвижной микрокамерой; на медной подкладке	0,3	–	2,0	1,6	1,0	40...50	5,6	2,3	
	0,5			1,2	2,0	60...80			
	0,7					80...100	6,5		
	1,0			1,5	3,5	80...120	7,5		
	1,5					100			
	2,0					160			
Автоматическая, без присадки; в камере, наполненной аргоном; без подкладки	1,0	–	2,0	1,2	1,5	70...100	В камере избыточное давление аргона 0,1 ати	–	
	1,5			1,5		100			
	2,0					140...160			

Лучшим способом защиты металла шва и ОШЗ от насыщения газами является общая защита инертным газом, находящимся в спокойном состоянии. Для сварки с общей защитой применяются герметические камеры, обеспечивающие получение вакуума до  $10^{-4}$  мм рт.ст. После создания такого вакуума камера наполняется аргоном или гелием до атмосферного давления с точностью  $\pm 0,2$  ати. Сварка в камере проводится без подачи инертного газа в горелку. Сварные швы, выполненные в герметической камере, наполненные инертным газом, по устойчивости против коррозии не уступают основному металлу.

ЭЛС ниобия выполняют при остаточном давлении в камере  $\leq 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Натекание в камеру не должно превышать  $4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> · Па/с. Повышение давления при сварке ниобиевых сплавов снижает пластичность и вязкость сварных соединений.

Для изготовления сварных конструкций наряду с нелегированным ниобием находят применение его сплавы с твердорастворным и гетерофазным упрочнением. Ниобий легируют вольфрамом, молибденом, tantalом, ванадием, цирконием, титаном, гафнием. Цирконий, гафний, титан упрочняют ниобий не только благодаря растворному механизму, но и за счет образования фаз внедрения.

Литая структура шва ниобия и его сплавов имеет весьма крупное зерно; ЗТВ характеризуется неравномерной структурой. Наиболее крупное зерно наблюдается в участке, непосредственно примыкающем к шву. При ЭЛС ЗТВ в 3 раза меньше, чем при аргонодуговой. Сплавы с твердорастворным упрочнением практически нечувствительны к режимам сварки, в то время как при сварке сплавов с гетерофазным упрочнением для получения оптимальных структур и, соответственно, механических свойств должны соблюдаться термические циклы сварки, обеспечивающие определенные интервалы скоростей охлаждения.

Прочность шва нелегированного ниобия ниже, чем основного металла (0,7 прочности рекристаллизованного металла), причем при ЭЛС происходит большее разупрочнение, чем при дуговой сварке в защитной атмосфере, что связано с дегазацией расплавленного металла в процессе сварки и рафинированием его от примесей внедрения. Прочность металла шва нелегированного ниобия может быть повышена введением в него легирующих добавок, например циркония или ванадия. Прочностные и

пластические характеристики сплавов с твердорастворным упрочнением находятся на уровне основного металла.

В сварных соединениях ниобиевых сплавов наблюдаются такие виды дефектов, как трещины и особенно пористость. В основном эти дефекты возникают при сварке металлов, загрязненных примесями внедрения. Для предотвращения образования трещин сварку рекомендуется вести возможно более узким электронным пучком. При этом уменьшаются внутренние деформации. Одним из методов борьбы с пористостью являются дополнительная очистка и дегазация кромок путем их подогрева расфокусированным пучком.

**Сварка tantalа и его сплавов.** Наиболее сильный упрочнитель твердого раствора в tantalовых сплавах – вольфрам. Кроме того, tantal легируют также молибденом, гафнием и рением, которые обеспечивают твердорастворное и гетерофазное упрочнение. Технология ЭЛС tantalа практически не отличается от технологии сварки ниобия. Требования к сварочному оборудованию, подготовке кромок под сварку, сборка, техника сварки такие же, как и для ниобия. В связи с более высокой температурой плавления при сварке tantalа той же толщины, что и ниобий, требуется применение в 2 – 3 раза больших мощностей электронного пучка. Сварное соединение нелегированного tantalа, сохраняя пластичность на уровне основного металла, разупрочняется. Его прочность составляет 0,75...0,8 уровня основного рекристаллизованного металла (прочность металла шва 356 МПа, а основного металла 463 МПа). Угол изгиба в обоих случаях 180°.

Сварные швы tantalовых сплавов Та – 10 % W и Та – 12,5 % W пластичны при комнатных температурах и переходят в хрупкое состояние при температуре 200 К. Швы с большим содержанием вольфрама (сплав Та – 17 % W) склонны к образованию ГТ и имеют повышенную хрупкость при комнатной температуре.

**Сварка ванадия и его сплавов.** В настоящее время кроме нелегированного ванадия разработан ряд сплавов на его основе с твердорастворным и гетерофазным упрочнением. Типичными представителями сплавов первой и второй групп являются соответственно системы V – Nb и V – Zr – C.

Технология и техника ЭЛС ванадия аналогичны применяемым для ниобия и tantalа.

Нелегированный ванадий при сварке разупрочняется, и для увеличения его прочности требуется дополнительное легирование металла шва. Механические характеристики сварных соединений сплавов с твердорастворным упрочнением остаются на уровне основного металла. Так, сварной шов сплава V – 12 % W имеет прочность 556 МПа и относительное удлинение 20 %; прочность основного рекристаллизованного металла 520...540 МПа, относительное удлинение 20...22 %. Для получения

удовлетворительных механических характеристик сварных соединений сплавов с гетерофазным упрочнением необходима термообработка: отжиг при температуре 1100...1200 °C с выдержкой 1 ч и охлаждением с печью.

Ориентировочные режимы ЭЛС ванадия, ниобия и tantalа и их сплавов приведены в табл. 12.6.

Механические свойства сварных соединений из сплавов на основе ванадия, ниобия и tantalа приведены в табл. 12.7.

### 12.6. Ориентировочные режимы ЭЛС ванадия, ниобия, tantalа и их сплавов

Металл	Толщина металла, мм	$I_k$ , мА	$U_{yc}$ , кВ	$v_{cb}, 1 \cdot 10^{-3}$ м/с
Ванадий	0,5	25...30	17,0...17,5	5,6...8,4 16,8
	1,0	60...67	12,5...12,9	
	2,0	90...100	12,5...13,5	
Ниобий	0,8	40	23	7,3
	1,0	65...70	17,0...17,5	8,4
	1,5	85	27	
Тантал	0,5	60	18	7,3
	1,0	80		14,0

Условные обозначения:  $I_k$  – ток катода;  $U_{yc}$  – ускоряющее напряжение.

### 12.7. Механические свойства сварных соединений ванадия, ниобия, tantalа и их сплавов (средние показатели)

Сплав	Толщина металла, мм	Способ сварки	Основной металл			Сварное соединение			
			$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , °	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , °	
Технический ванадий	1,0	Гелиево-дуговая в камере	647,5*	4,0	–	376,7	23,0	–	
			445,4**	24,0		627,8	16,0		
			941,8*	4,2	–	570,0	18,0		
			510,1**	16,0		545,4	20,5		
Система V – Zr – C	V + 12 % W	Аргонодуговая в камере	951,6*	3,5	–	207,0	21,3	180	
		ЭЛС	519,9**	21,0		487,6	–		
		Аргонодуговая в камере	286,5**	26,1		524,8			
Технический ниобий	2,0	Аргонодуговая в камере	686,7*	–	180	470,9	–	180	
	0,8		760,3			–			
Nb + 3 % V + 6 % Ta	1,0	ЭЛС	–	–	–	–	–	–	

Окончание табл. 12.7

Сплав	Толщина металла, мм	Способ сварки	Основной металл			Сварное соединение		
			$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , °	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , °
Система Nb – W – Mo – Zr	20	Аргонодуговая в камере	461**	23,6	–	448	19,4	–
Система Nb – Zr – C			320,8**	26,0	–	451	14,2	–
Технический tantal			546,4*	–	180	490,5	–	180

\* Деформированный.  
\*\* Отожженный.

**Контактная сварка.** Точечная и шовная сварка осложняются подплавлением электродов. Применение экранов и покрытие свариваемых деталей, например, графитом значительно снижают подплавление электродов. Хорошие результаты дает использование накладок из молибдена, а также сплавов системы W – Mo. Точечную и шовную сварку выполняют с защитой инертным газом, ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 12.8 и 12.9. Для соединения фольги и проволоки из технически чистых тугоплавких металлов успешно применяют конденсаторную точечную сварку.

## 12.8. Ориентировочные режимы точечной сварки ниобия и его сплавов

Толщина металла, мм	Удельное давление при сварке, МПа	Диаметр точки, мм
0,5	82,4	3,8
1,0	515,0	5,0
1,5	412,0	7,5
2,5	343,4	10,0

**Диффузионная сварка.** Ее выполняют в камерах при вакууме  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. Рекомендуется следующий режим сварки ниобия:  $T = 1250$  °C;  $p = 14,7$  МПа;  $t = 5$  мин. Для снижения температуры сварки с целью предотвращения чрезмерного роста зерен диффузионные процессы интенсифицируют использованием промежуточных металлов, которые наносят на свариваемые поверхности (например, напылением в вакууме). Толщина наносимого слоя – от нескольких десятков до нескольких тысяч ангстрем. В качестве прокладки при сварке ниобия рекомендуется использовать никель, а сварку – осуществлять на таком режиме:  $T = 1000$  °C;  $p = 19,6$  МПа;  $t = 30$  мин. Прочность сварного соединения составляет 0,9 прочности основного металла. Диффузионное соединение tantalа выполняют на следующем режиме:  $T = 1650$  °C;  $p = 1,8$  МПа;  $t = 20$  мин.

Диффузионная сварка применяется для соединения разнородных тугоплавких металлов (например, сплава на основе ниобия 5ВМЦ со сплавами tantalа ТВ-10 и молибдена ЦМ-6, а также со сплавами титана). Для соединения ниобия со сталью успешно используется ударная сварка в вакууме.

## 12.9. Ориентировочные режимы шовной сварки ниобия и его сплавов

Толщина металла, мм	Сила на электродах, Н	$I_{cb}$ , А	Продолжительность в периодах тока, с		$U$ , В	
			импульса	паузы	холостого хода	при замкнутой цепи
0,125	112,8	1100	3	2	0,8	0,7
0,25	225,6	3300			1,3	1,05
0,5		4000			1,6	1,25

**Сварка трением.** Тугоплавкие металлы сваривают в вакуумных камерах. Для этой цели стандартные установки (например, типа УСМТ-45) модернизируют: на них устанавливают герметичные камеры с системой откачки.

Сварку взрывом с последующей прокаткой применяют для получения стали, плакированной tantalом. Коррозионная стойкость сварных химических аппаратов, изготовленных из такого биметалла, настолько велика, что они успешно работают даже в тех весьма агрессивных средах, в которых до последнего времени стойким считали только золото.

#### 12.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА, ВОЛЬФРАМА И ХРОМА

Металлы VI подгруппы (мolibден, вольфрам, хром) и их сплавы по сравнению с другими конструкционными химически активными и тугоплавкими металлами и сплавами имеют наихудшую свариваемость.

Преимуществами хрома являются высокая окалиностойкость в сочетании с относительно высокой температурой плавления, прочностью и малой плотностью. Однако низкая сопротивляемость тепловым и ударным нагрузкам и исключительно высокая склонность к хладноломкости по сравнению с другими тугоплавкими металлами ограничивают возможность его использования в сварных конструкциях.

Молибден и вольфрам являются основой для создания жаропрочных сплавов в связи с их высокими тугоплавкостью, модулем упругости, термостойкостью, тепло- и электропроводностью. Преимуществом молибдена является вдвое меньшая, чем у вольфрама, плотность. Вольфрам обладает высокой тугоплавкостью. Общие недостатки – низкая окалиностойкость и высокая склонность к хладноломкости.

Для этих металлов характерны ничтожная растворимость примесей внедрения, обусловленная небольшими размерами атомов и междуузлий, а также их электронным строением, и чрезвычайно высокая чувствительность к наличию примесей. Превышение пределов растворимости приводит к образованию соединений металлов с примесями внедрения (оксидов, нитридов, карбидов и др.), располагающимися преимущественно по границам зерен и охрупчивающими их. Наиболее сильно охрупчивает кислород. Растворенный в твердом металле

кислород резко увеличивает твердость, а хрупкие оксиды, имеющие слабую связь с металлом, располагаясь по границам зерен, часто катастрофически снижают прочность и пластичность металлов.

В конструкциях эти металлы используются в виде сплавов. Для сохранения пластичности и повышения прочности металлов VI группы их легируют:

- элементами (в количестве <1 %), имеющими к этим металлам большое сродство и образующими с ними растворы замещения; указанные элементы существенно уменьшают влияние примесей; цирконий, гафний, кальций, вольфрам, лантан, образуя нитриды, очищают матрицу сплава от этой примеси; ниобий, tantal, титан, цирконий хорошо связывают также углерод; титан, цирконий, ванадий, германий, лантан очищают от кислорода;

- металлическими элементами совместно с углеродом для гетерофазного упрочнения путем образования мелкодисперсной фазы в матрице сплава. Углерод наряду с тем, что является раскислителем и модификатором, образует карбиды с этими элементами. Легирование допускается: для хрома – никелем, рением; для молибдена – рением, вольфрамом; для вольфрама – рением и молибденом.

В отличие от металлов IV и V группы эти металлы не дают устойчивых гидридов. Водород в этих металлах образует твердые растворы внедрения и обладает большой подвижностью, десорбируясь при охлаждении, поэтому данные металлы не склонны к водородной хрупкости. Несмотря на меньшую, чем у металлов IV и V групп, активность, требуется более тщательная их защита (в связи с повышенной чувствительностью к примесям внедрения), достигаемая сваркой в высоком вакууме и инертных газах высокой чистоты.

Металлы этих групп чрезвычайно чувствительны к термическому циклу сварки при наличии примесей, содержание которых в исходном материале, как правило, значительно выше предела растворимости. Увеличение зерна, перегрев, рекристаллизация, появление примесных фаз на границах зерен под действием термического цикла приводят к резкому увеличению порога хладноломкости и склонности к ГТ. Температура порога хладноломкости металла шва и рекристаллизованной ЗТВ, как правило,  $>20^{\circ}\text{C}$ . Для рекристаллизованной зоны характерен провал пластичности. Высокая склонность к горячим трещинам связана:

- с наличием примесей внедрения, вызывающих охрупчивание металла и образование легкоплавких эвтектик по границам зерен;
- с высокими напряжениями и темпом деформаций в связи с большим модулем упругости.

Высококачественные сварные соединения получаются при использовании металлов высокой чистоты и однородности по примесям. Необходимо использовать также методы сварки, обеспечивающие образование сварного соединения без насыщения примесями внедрения. Основными из них являются методы сварки плавлением: электронно-лучевая, дуговая в инертных газах в камерах с контролируемой атмосферой, сварка полым катодом, лазером. Хорошее качество соединений достигается при диффузионной сварке.

**Дуговая сварка.** Перед сваркой кромки деталей подвергают тщательной очистке и травлению. Для сплавов молибдена рекомендуются следующие травители: раствор фосфорной и азотной кислот (1 : 1), разбавленный водой до плотности 1,37...1,38; 54 % (об.)  $H_2SO_4$ ; 45 % (об.)  $HNO_3$ ; 1,0 % (об.) HF; 18,8 г  $Cr_2O_3$  на 1 л раствора; травление при 60 °C в течение 30 с. Применяется также электролитическое травление в течение 30 с в электролитах такого состава: 50 мл  $HCl$ , 20 мл  $H_2SO_4$ , 150 мл метилового спирта; по 50 % (об.)  $HCl$  и  $H_2O$ .

После травления кромки деталей промывают в воде и просушивают; непосредственно перед сваркой кромки обезжиривают и обезвоживают этиловым спиртом или ацетоном.

Сварка в камерах с контролируемой атмосферой выполняется в предварительно очищенном и осуженном инертном газе, вакуум до заполнения камеры  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Для лучшей очистки инертного газа рекомендуется перед сваркой изделий в течение нескольких минут проварить титан или цирконий.

Повышению качества сварных соединений могут способствовать предварительные отжиг и подогрев основного металла, а также последующий отжиг сварного соединения. Отжиг основного металла перед сваркой снижает степень его неоднородности и напряжения, а в ряде случаев (например, при отжиге в высоком вакууме) уменьшает содержание примесей внедрений. Так, для молибдена температуру отжига рекомендуют принимать в интервале температур 875...900 °C. Предварительный нагрев (для молибдена 200...500 °C, для вольфрама 300...600 °C), а также сопутствую-

щий подогрев до 600...650 °C способствуют понижению хрупкости соединений, вносят изменения в термические циклы сварки, благодаря этому в ряде случаев устраняют склонность швов к образованию трещин. В то же время эти технологические меры неблагоприятно действуют на качество соединений вследствие диффузионного перераспределения примесей, выпадения их соединений на границах, а также образования вторичных фаз. Поэтому необходимость предварительного подогрева устанавливается в каждом конкретном случае в зависимости от типа сплава, его толщины и степени чистоты, а также вида сварного соединения и жесткости конструкции. Отжиг сварных соединений (для молибдена при ~1000 °C, для вольфрама при ~1800 °C) используют для снятия остаточных напряжений и стабилизации структуры металла шва и ОШЗ. Наиболее широко применяется сварка молибдена и его сплавов.

Режимы дуговой сварки молибденовых сплавов неплавящимся электродом в аргоне приведены в табл. 12.10.

Молибденовые сплавы можно сваривать плавящимся электродом при постоянном токе обратной полярности (табл. 12.11). Для стабилизации процесса сварки на поверхность молибденовой проволоки диаметром 1 мм наносят ионизирующее покрытие CsCl.

## 12.10. Ориентировочные режимы механизированной сварки в инертных газах неплавящимся электродом сплавов на основе молибдена

Толщина металла, мм	Условия сварки	$I_{cv}$ , А	$V_{cv}$ , $1 \cdot 10^{-3}$ м/с
1,0	Камера, гелий	65	5,0
		55	4,5
1,5	Камера, аргон	180	2,3
1,6	На воздухе, гелий	220*	5,0
2,0	Камера, аргон	270**	4,5
3,2	Камера, гелий	160	3,4

\* Диаметр сопла 16 мм; расход гелия: в горелку 19 л/мин; в насадку 14 л/мин, для защиты корня шва 14 л/мин.

\*\* Сварка с присадочной проволокой.

### 12.11. Ориентировочные режимы сварки тонколистовых молибденовых сплавов плавящимся электродом

Толщина металла, мм	Число проходов	$I_{\text{св}}$ , А	$U_d$ , В	$v_n^*$ , $1 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v_{\text{св}}$ , $1 \cdot 10^{-3}$ м/с	Диаметр сопла, мм	Расход гелия, л/мин	
							в горелку	в насадку
3,2	1	470	32	16,8	8,4	25,4	70	70
6,4	2	440	30	14,0				

\* Скорость перемещения плавящегося электрода.

Хорошее качество сварных соединений достигается при применении присадочных материалов с пониженной чувствительностью к примесям внедрения. Например, легирование металла шва при сварке молибденовых сплавов ВМ1, ЦМ2, ЦМ6 рением в пределах 46...50 % (мас.) является эффективным средством повышения его пластичности. Для легирования используют проволоку МР47, ВП или фольгу из чистого рения. Введение в молибден элементов-модификаторов ( $\leq 0,06\%$  С) и элементов VIII группы (железо, кобальт, никель, иридий) повышает пластичность в литом и рекристаллизованном состояниях в связи с измельчением зерна, снижает предел текучести, уменьшает структурную и химическую неоднородности по сечению соединения. В сплавах, содержащих углерод, цирконий и титан повышают пластичность ( $< 1\%$ ).

Прочность и пластичность сварных швов молибдена, как правило, ниже прочности основного металла. Повышают прочность и пластичность металла шва применением легированной присадки (табл. 12.12).

**Сварка вольфрама.** При дуговой сварке сплавов на основе вольфрама рекомендуется использовать гелий и применять сравнительно небольшие скорости сварки: для металла толщиной 1,5 мм ( $2,1 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с).

### 12.12. Прочность стыковых соединений молибдена, выполненных сваркой плавлением

Сварка	Температура испытаний, °C	$\sigma_b$ , МПа
Аргонодуговая в камере неплавящимся электродом без присадки	20	385,9
	1000	311,6
То же с присадкой из сплава по 50 % Mo и Re	20	576,6
	1000	316,2

Сварные соединения вольфрама при нормальной температуре хрупки и весьма склонны к образованию трещин. Поэтому сварку выполняют с предварительным подогревом основного металла до температуры  $\geq 500$  °C. Чтобы предупредить образование трещин, детали необходимо сваривать без их жесткого закрепления. Пластичность сварных соединений вольфрама можно несколько повысить после термообработки, подразумевающей нагрев до температуры 1800 °C, выдержку в течение 1 ч, охлаждение с печью.

**Сварка хрома.** При нормальной температуре сварные соединения малопластичны. Временное сопротивление соединений тонколистового технического хрома ( $\delta = 1 \dots 2$  мм) достигает 279 МПа (прочность основного металла  $\sim 372$  МПа) при относительном удлинении до 7 %.

**Электронно-лучевая сварка.** Поверхность свариваемых кромок непосредственно перед сваркой должна быть тщательно очищена. Основным методом очистки поверхности молибденовых сплавов является химическое травление.

Хорошие результаты дает травление в смеси фосфорной и азотной кислот (1 : 1), разбавленной водой до плотности (1,37...1,38)  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Электролитическую очистку рекомендуется проводить либо в электролите Куна (150 мл метилового спирта, 50 мл соляной кислоты и 20 мл серной кислоты), либо в электролите, состоящем из 50 % HCl и 50 % H<sub>2</sub>O. После всех способов химической и электролитической очистки необходимы тщательная промывка в горячей проточной воде, этиловом спирте и сушка струей горячего воздуха.

Тепловложение при ЭЛС молибдена и его сплавов при  $v_{\text{св}} = 8,4 \dots 11,2$  мм/с составляет 1...2 кВт на каждый миллиметр толщины.

Ориентировочные режимы ЭЛС молибденовых сплавов представлены в табл. 12.13.

### 12.13. Ориентировочные режимы ЭЛС тонколистовых молибденовых сплавов

Толщина металла, мм	$I_{yc}$ , мА	$U_{yc}$ , кВ	$v_{cb}$ , $1 \cdot 10^{-3}$ м/с
1,0	70...90	18...20	16,8
2,0	100...120	20...22	11,2
3,0	200...250		8,4

Как правило, ЭЛС молибденовых сплавов проводится без предварительного подогрева свариваемых деталей. Однако при жестком закреплении свариваемых узлов и стыковой сварке листов различной толщины предварительный подогрев желателен для снижения сварочных напряжений и предотвращения холодных трещин при сварке на больших скоростях. Для получения швов без подрезов при сварке на повышенных скоростях используются колебания пучка вдоль направления сварки. Относительное удлинение металла шва при этом  $\leq 1,5\ldots 2,0\%$ . Низкая пластичность обусловлена как крупнокристаллической структурой металла шва и ЗТВ и распределением примесей по границам кристаллитов, так и высокой чувствительностью молибдена к поверхностным дефектам. Устранение микронадрезов и царапин с поверхности испытуемого образца шлифовкой и последующей полировкой позволяет получать значение относительного удлинения  $\sim 20\ldots 130\%$ .

Лучшей свариваемостью с позиций низкотемпературной пластичности обладает сплав ЦМ-10. Температура хладноломкости сварных соединений сплавов ЦМ-10, ЦМ-6, ТСМ-3, МЧВП и Mo – 0,5 Ti составляет соответственно 250, 280, 330, 450 и 670 К. Легирование металла шва промышленных сплавов рением в процессе сварки позволяет значительно улучшить пластичность сварного соединения. Угол изгиба сварных образцов толщиной 1 мм стабильно составляет  $180^\circ$ , а прочность металла шва при нормальной температуре близка к прочности основного металла.

Прочность сварных соединений промышленных низколегированных молибденовых сплавов при комнатной температуре, как правило, ниже прочности основного металла в деформированном состоянии, но равна прочности рекристаллизованного металла. Для низколегированных сплавов ЦМ-6 и ЦМ-10 прочность металла шва при нормальной температуре

ре составляет 0,7...0,8 прочности основного металла в деформированном состоянии. Предел прочности при комнатной температуре швов на листах толщиной 0,12...2,5 мм сплава Mo – 0,5 Ti незначительно отличается от прочности рекристаллизованного металла. При 1370 К прочность сварного соединения сравнивается с прочностью исходного материала.

За исключением порошкового материала и молибдена марки МЧВП, поры в сварных соединениях низколегированных сплавов, полученных методом электронно-лучевой или вакуумно-дуговой плавки, отсутствуют. Наличие пор в первом случае свидетельствует о неполном раскислении молибдена в процессе его изготовления. Появление пор в сварных соединениях, полученных на литых и деформированных сплавах молибдена, свидетельствует о плохой подготовке кромок к сварке. В этом случае последующий переплав металла шва позволяет устраниТЬ пористость, однако пластичность шва остается на низком уровне.

**Сварка вольфрама и сплавов на его основе.** Сплавы на основе вольфрама удовлетворительно свариваются с помощью электронного пучка. Однако высокая хрупкость сварных соединений, большая склонность к поро- и трещинообразованию, а также значительная чувствительность к термическому циклу сварки ограничивают технологические возможности ЭЛС. При сварке на скоростях 8,4...11,2  $\text{мм}/\text{с}$  требуется тепловложение до 2...3 кВт на каждый миллиметр толщины вольфрама.

Качество сварных соединений в значительной степени определяется способом подготовки кромок к сварке. Твердость холоднокатаных листов вольфрама достигает 50 HRC, поэтому резку листов под сварку следует производить абразивными кругами, что также предупреждает образование расслоений и трещин в свариваемых кромках. Наличие расслоений и микротрещин в поверхностном слое свариваемых кромок приводит к плохому формированию шва, образованию пор и трещин.

Перед сваркой необходимо тщательно очищать поверхность свариваемых кромок от оксидов и загрязнений. Для этой цели используют химическое травление в расплавленных щелочах или смесях кислот, а также электролитическую полировку. Подготовка листов к сварке включает в себя следующие операции:

- погружение в расплавленную щелочь;
- погружение в расплав гидрита натрия при температуре 873 К;

- электрополировку в течение 30 с в 20%-ном растворе KOH;
- погружение на 5 мин в кипящий раствор KOH;
- отжиг при 1273 К в течение 1 ч в атмосфере сухого водорода.

Влияние режимов ЭЛС на качество различных вольфрамовых материалов неоднозначно.

На нелегированном вольфраме вакуумно-дуговой плавкой не удается получить высококачественных швов при сварке в диапазоне скоростей 6...42 мм/с. Сплав W – 25 % Re сваривался удовлетворительно. Наиболее стабильные по качеству швы были получены на порошковом сплаве W – 25 % Re – 30 % Mo при сварке на средних скоростях.

Подогрев свариваемых листов в процессе сварки не оказывает заметного влияния на свойства сварных соединений сплавов вольфрама. Однако он является очень эффективным способом предотвращения холодных трещин при сварке чистого вольфрама. Подогрев листов в процессе сварки до температуры 700 К позволяет получать бездефектные сварные соединения на газофазном вольфраме. Рекомендуемая температура сопутствующего сварке подогрева колеблется в интервале 700...1000 К. Если при сварке нелегированного вольфрама вакуумно-дуговой или электроннолучевой плавкой подогрев необходим при сварке на любых скоростях, то при сварке порошкового вольфрама он оказывается нужным только при скоростях, превышающих 8,4 мм/с. Предварительный подогрев в процессе сварки не обязателен с позиции улучшения пластичности сварных соединений сплава W – 25 % Re, однако он позволяет вести сварку на скоростях 28...42 мм/с и значительно снижает чувствительность этого сплава к ГТ.

Прочность сварного соединения при температуре 1500 К составляет 50 % прочности исходного материала. При температуре >1725 К прочностные характеристики основного металла и сварного соединения становятся равными. Пластичность различных зон сварного соединения отличается незначительно. Как правило, разрушение образцов при испытании на растяжение происходит по линии сплавления.

#### **Сварка хрома и сплавов на его основе.**

Применение ЭЛС для получения соединений хрома и его низколегированных сплавов сопряжено с определенными трудностями:

- сложностью расплавления металла в вакууме вследствие сильной возгонки хрома, что вызвано высокой упругостью его паров, достигающей при плавлении  $8 \cdot 10^3$  Па;
- предотвращением образования холодных трещин в металле шва и ЗТВ, обусловленного низкой пластичностью хрома при комнатной температуре;
- содержанием в хроме промышленной чистоты примесей внедрения в количествах, значительно превышающих предел их растворимости, что зачастую приводит к образованию кристаллизационных ГТ.

Вредное влияние азота, углерода и кислорода можно существенно уменьшить, легируя хром небольшим количеством элементов, образующих с ним термодинамически стабильные соединения. Легируя хром редкоземельными элементами, такими как иттрий, церий, лантан, можно очистить матрицу сплава от кислорода. Титан, цирконий, гафний, введенные в сплав в количестве 0,05...0,25 %, нейтрализуют вредное влияние азота и углерода. Поэтому при выборе сплава хрома для создания сварных конструкций предпочтение следует отдать низколегированным сплавам (суммарное содержание легирующих элементов и примесей внедрения не должно превышать 2 %), которые свариваются лучше, чем технический хром.

При сварке хрома требуется создавать вакуум в камере  $\geq(6...8) \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. Отжиг сварных соединений при  $T \approx 800$  °C несколько снижает критическую температуру перехода металла шва из вязкого состояния в хрупкое.

**Сварка давлением.** Для тонколистового молибдена применяется контактная точечная сварка (табл. 12.14). Большая прочность и твердость металла при повышенной температуре, а также сравнительно высокая электропроводность создают затруднения при сварке: быстро изнашиваются электроды, вследствие чего возможно загрязнение точек электродным металлом. Для предохранения шва от загрязнения применяемые электрод и прокладку между электродом и изделием, например из титановой фольги, интенсивно охлаждают. Сварку рекомендуется выполнять короткими импульсами, чтобы избежать чрезмерного роста зерен. Перед сваркой необходимо тщательно очистить поверхность детали и проравить ее. Механические свойства точечных соединений улучшаются при использовании тонких прокладок, помещаемых между свариваемыми листами (из никеля, циркония или титана).

### 12.14. Ориентировочные режимы точечной сварки листовых молибденовых сплавов

Толщина металла, мм	Энергия, кВт · с	Конечное давление, МПа	Диаметр электрода, мм
0,5	1,5	784,8	3,8
1,0	3,5	490,5	5,6
1,5	5,5	392,4	7,4
2,0	8,8	343,4	9,1
2,5	12,0		11,2

Молибденовые сплавы сваривают точечным способом с никелем, tantalом, коррозионно-стойкой сталью. Стыковая сварка прутков из молибденовых сплавов выполняется в вакууме или защитной среде аргона. Угол загиба сварного соединения при нормальной температуре достигает 90°, относительное удлинение наружных слоев 40 %.

**Диффузионная сварка** проводится в камерах при вакууме  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. Рекомендуемые параметры режима сварки: для молибдена  $T = 1700^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 9,81$  МПа,  $t = 5$  мин; для вольфрама  $T = 2200^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 9,81$  МПа,  $t = 15$  мин.

В связи с тем что при диффузионной сварке тугоплавких металлов необходима высокая температура, для них эффективен нагрев зоны соединения электронно-лучевым способом с помощью специальных кольцевых пушек. Процесс диффузионного соединения деталей из вольфрама можно ускорить применением промежуточных прослоек из никеля и других металлов.

Диффузионные соединения обладают практически теми же свойствами, что и основной металл. Тугоплавкие металлы можно сваривать диффузионным способом между собой, а также с другими металлами (молибден со сталью, титаном, никелем, медью; вольфрам с

молибденом и медью и др.). Оптимальны следующие параметры режима диффузионной сварки: для молибдена со сталью 12Х18Н9Т  $T = 1200^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 4,9 \dots 9,8$  МПа,  $t = 15$  мин, вакуум  $10^{-4}$  мм рт.ст.; для молибдена с никелем  $T = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 6,9$  МПа;  $t = 20$  мин, вакуум  $10^{-4}$  мм рт.ст.

Молибден с медью сваривают с использованием прослойки из никеля при следующих параметрах режима сварки:  $T = 950 \dots 1050^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 14,7 \dots 15,8$  МПа,  $t = 10 \dots 40$  мин, вакуум  $10^{-4}$  мм рт.ст. Диффузионную сварку вольфрама с медью рекомендуется проводить через промежуточный слой с такими параметрами режима сварки:  $T = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 15,8$  МПа,  $t = 25 \dots 30$  мин, вакуум  $10^{-4}$  мм рт.ст.

**Сварка трением.** Молибден и вольфрам удовлетворительно свариваются в вакуумных камерах. Для сварки молибдена и особенно вольфрама требуются высокие скорости вращения (табл. 12.15).

Для деформированного металла давление осадки должно быть на 30...40 % больше, чем для отожженного.

### 12.5. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Композиционные материалы (КМ) – это гетерофазные материалы, состоящие из двух или более компонентов (матриц и наполнителей), различных по химическому составу и разделенных между собой поверхностями раздела. Наполнителями чаще всего являются вещества с высокой энергией межатомных связей, высокопрочные и высокомодульные, однако с хрупкими матрицами могут сочетаться и высокопластичные наполнители. Связующие компоненты, или матрицы, могут быть различными: полимерными, керамическими, металлическими или смешанными. В последнем случае говорят о полиматричных КМ.

### 12.15. Ориентировочные режимы сварки трением деталей из молибдена и вольфрама

Параметр	Молибден		Вольфрам	
	деформированный	отожженный	деформированный	отожженный
Линейная скорость вращения, м/с	9	11	13	18
Давление осадки, МПа	42	28	38,5	21,0

Основные признаки КМ сводятся к следующему:

- свойства КМ определяются каждым из компонентов, присутствующим в материале в заметном количестве;
- КМ имеет свойства, которыми не обладают его компоненты, взятые отдельно;
- состав, форма, распределение компонентов в КМ проектируются заранее;
- КМ неоднороден в микромасштабе, но однороден макроскопически.

Согласно последнему признаку такие материалы, как слоистые разнородные, или биметаллические, и материалы с покрытиями, к КМ не относятся, но в то же время пористые материалы, гетерофазные сплавы с односторонней или неориентированной структурой, в том числе дисперсионнотвердеющие, могут рассматриваться как КМ.

Здесь рассматриваются только КМ с металлическими матрицами, представляющие собой сочетание металлических сплавов с различными наполнителями: металлами, неметаллами, интерметаллическими соединениями, керамикой – в виде непрерывных или коротких волокон, нитевидных кристаллов (НК) и частиц.

КМ с металлическими матрицами обладают рядом неоспоримых преимуществ перед другими конструкционными материалами, предназначенными для работы в экстремальных условиях. К этим преимуществам относятся:

- высокие прочность и жесткость в сочетании с высокой вязкостью разрушения;
- высокие удельные прочность и жесткость (отношение предела прочности и модуля упругости к удельному весу:  $\sigma_b/\gamma$  и  $E/\gamma$ );
- высокий предел усталости;

- высокая жаропрочность;
- малая чувствительность к тепловым ударам, к поверхностным дефектам;
- высокие демпфирующие свойства, электро- и теплопроводность, технологичность при конструировании и обработке;
- возможность соединения методами сварки и пайки (табл. 12.16).

#### 12.5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КМ

По морфологии армирующих фаз КМ подразделяют на:

- нуль-мерные (обозначение  $0_x$ ), или упрочненные частицами различной дисперсности, беспорядочно распределенными в матрице;
- одномерные волокнистые (обозначение 1), или упрочненные односторонними непрерывными или дискретными волокнами;
- двухмерные слоистые (обозначение 2), или содержащие одинаково ориентированные упрочняющие ламели, или слои.

Применяют и комбинированное армирование матриц, например:  $0_x + 1$  – упрочнение частицами и волокнами;  $1 + 2$  – упрочнение волокнами и слоями;  $1 + 2 + 0_x$  – упрочнение волокнами, слоями и частицами и т.д. Эвтектические сплавы, полученные методом направленной кристаллизации, следует отнести к одномерным волокнистым КМ (1) или к КМ с комбинированным армированием ( $1 + 0_x$ ), если матрица содержит дополнительную дисперсную упрочняющую фазу; гетерофазные сплавы с изолированными включениями вторых фаз – к нуль-мерным ( $0_x$ ).

#### 12.16. КМ с металлическими матрицами в сравнении с лучшими металлическими конструкционными материалами

Сравниваемые характеристики	Материалы	
	лучшие металлические	КМ
Удельная прочность $\sigma_b/\gamma$ , км	20...30	50...70
Удельный модуль упругости $E/\gamma$ , км	$(2...3) \cdot 10^3$	$(5...7) \cdot 10^3$
Предел усталости	$(0,3...0,5) \sigma_b$	$(0,6...0,75) \sigma_b$
Отношение максимальной температуры эксплуатации к температуре плавления $T_{экспл} / T_{пл}$	0,4...0,5	0,8...0,9

По распределению армирующих фаз или схеме армирования можно выделить КМ с однносным (однонаправленным), двухосным (плоскостным, например ортогональным) и трехосным (объемным) армированием. КМ первых двух видов анизотропны, последнего вида – изотропны. По размеру армирующих фаз или размеру ячейки армирования КМ подразделяются следующим образом:

- субмикрокомпозиты (размер ячейки армирования, диаметр волокон или частиц  $<1$  мкм), например дисперсно-упрочненные сплавы или волокнистые КМ с очень тонкими волокнами;
- микрокомпозиты (размер ячейки армирования, диаметр волокон, частиц или толщина слоев  $\geq 1$  мкм), например КМ, армированные частицами, волокнами углерода, карбидами кремния, бора и т.д., гетерофазные, в том числе однонаправленные эвтектические сплавы;
- макрокомпозиты (диаметр или толщина армирующих компонентов  $\sim 100$  мкм), например медные или алюминиевые матрицы, армированные вольфрамовой или стальной проволокой.

#### 12.5.2. МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КМ

Сочетание в одном материале веществ, существенно отличающихся по химическому составу и физическим свойствам, выдвигает на первый план при изготовлении и соединении КМ проблему термодинамической и кинетической совместимости компонентов. Под термодинамической совместимостью понимают способность контактирующих фаз находиться в состоянии термодинамического равновесия неограниченное время при температурах получения и эксплуатации.

Термодинамическая совместимость характерна для естественных КМ. В таких КМ наполнитель формируется из исходных продуктов непосредственно в процессе изготовления материала. Режимы этого процесса (температурно-временные параметры контактирования исходных продуктов, режимы перемешивания и охлаждения, направленный теплоотвод, пластическое деформирование, термомеханическая обработка и пр.) определяют форму, дисперсность и распределение наполнителя в матрице. К естественным КМ относят: направленно-закристаллизованные эвтектические сплавы; сплавы из несмешиваемых или огра-

ниченно смешиваемых компонентов; КМ, полученные в процессах *in situ*, и др. В дальнейшем такие КМ будут называться композиционными сплавами. Отличительными особенностями естественных КМ являются низкий уровень внутренних напряжений и высокая адгезионная прочность, обусловленные структурным и размерным соответствием контактирующих фаз.

В искусственно созданных КМ объединяемые компоненты предположительно не должны изменять своих исходных свойств. Такие КМ называют наполненными (дисперсно-наполненные, или содержащие армирующие частицы; волокнистые, или содержащие наполнитель в виде волокон). Почти все искусственно созданные КМ обладают лишь кинетической совместимостью, или способностью сохранять метастабильное равновесие в определенных температурно-временных интервалах. Для достижения *кинетической физико-химической совместимости* компонентов таких КМ существуют следующие способы:

- разработка армирующих наполнителей, химически стойких в контакте с металлом матриц при высоких температурах, например волокон, НК или частиц из карбидов кремния, титана, циркония, бора, оксидов алюминия, циркония, нитридов бора, алюминия, кремния, боридов титана и др.;
- нанесение на армирующие наполнители барьерных покрытий, например покрытий из тугоплавких металлов, карбидов гафния, титана, бора, кремния, нитридов бора, боридов титана на волокна углерода и бора;
- выбор металлических матриц такого состава, который, с одной стороны, должен обеспечить прочную адгезионную связь между компонентами благодаря смачиванию, с другой, – позволяет ограничивать химическое взаимодействие в КМ благодаря образованию на поверхностях раздела матрица – наполнитель экранирующих, или барьерных, слоев;
- выбор оптимальных температурно-временных условий контактирования компонентов в процессах получения и эксплуатации КМ.

Длительность контактирования при получении КМ должна быть достаточной для возникновения прочных адгезионных связей, но не должна приводить к интенсивному химическому взаимодействию, образованию хрупких промежуточных фаз и деградации механических свойств компонентов КМ.

*Термомеханическую кинетическую совместимость компонентов КМ обеспечивают:*

- выбором матричных сплавов и наполнителей с минимальным различием в модулях упругости, коэффициентах Пуассона, коэффициентах термического расширения;
- применением промежуточных слоев и покрытий на армирующих наполнителях, уменьшающих различия в физических свойствах матрицы и наполнителей;
- переходом от армирования компонентом одного вида к полиармированию, т.е. сочетанию в одном КМ упрочняющих волокон, частиц или слоев, различающихся по размеру, составу и физическим свойствам;
- изменением геометрии деталей, схемы и масштаба армирования, морфологии, размера и объемной доли армирующих фаз, заменой непрерывного наполнителя дискретным.

В зависимости от материала наполнителя и матриц, способов и режимов получения по поверхностям раздела КМ реализуются шесть основных видов связи (табл. 12.17). Наиболее прочную связь между компонентами КМ с металлическими матрицами обеспечивает химическое взаимодействие. Распространенный вид связи смешанный, представленный твер-

дыми растворами и продуктами химических реакций – интерметаллидными фазами (например, КМ «алюминий-борные волокна», полученный непрерывным литьем) или твердыми растворами, интерметаллидными и оксидными фазами (КМ такой же композиции, полученный горячим прессованием плазменных полуфабрикатов).

#### 12.5.3. СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА КМ

Естественные металлические КМ из несмешиваемых компонентов и композиции *in situ* получают методами порошковой металлургии и/или литья. Для изготовления листов или профилей из таких КМ проводят процессы горячего прессования, прокатки или волочения порошковых или литьих заготовок. Однонаправленные эвтектические КМ получают методом направленной кристаллизации.

Технология производства искусственных металлических КМ определяется конструкцией изделий, особенно если они имеют сложную форму и требуют подготовки кромок для соединения сваркой, пайкой или клепкой, и, как правило, является многопереходной. Элементной основой производства деталей или полуфабрикатов (листов, труб, профилей) из таких

#### 12.17. Виды связи по поверхностям раздела КМ

Вид связи	Примеры
Механическая между компонентами	Стекловолокно, углеволокно – полимерная матрица
Смачивание, растворение	Медный расплав – вольфрамовые волокна
Образование новых фаз на поверхностях раздела в результате химической реакции между компонентами	Взаимодействие титана с волокнами бора $Ti + 2B \rightarrow TiB_2$
Обменные химические реакции между компонентами	Взаимодействие матрицы из титанового сплава, содержащего алюминий, с волокнами бора: $Ti(Al) + 2B \rightarrow (Ti, Al)B_2$ ; $Ti + (Ti, Al)B_2 \rightarrow TiB_2 + Ti(Al)$
Связь через оксиды	Образование шпинели на поверхностях раздела волокна сапфира – никелевая матрица: $NiO + Al_2O_3 \rightleftharpoons NiAl_2O_4$
Смешанная связь, или сочетание различных видов связи	Взаимодействие волокон бора с алюминиевым расплавом: смачивание, образование раствора $Al(B)$ , образование продуктов взаимодействия в виде изолированных фаз $AlB_{12}$ , $AlB_{10}$ , $AlB_2$

КМ служат так называемые препреги, или ленты с одним слоем армирующего наполнителя, пропитанным или покрытым матричными сплавами; пропитанные металлом жгуты волокон или индивидуальные волокна с покрытиями из матричных сплавов.

Детали и полуфабрикаты получают соединением (компактированием) исходных препретов методами пропитки, горячего прессования, прокатки или волочения пакетов из препретов. Иногда и препреги, и изделия из КМ изготавливают одними и теми же способами, например по порошковой или литейной технологиям.

Несмотря на многоступенчатый характер технологии производства, существует ряд общих требований к процессам изготовления КМ:

- распределение армирующего наполнителя в матрице в соответствии с заданными схемой, шагом и геометрией ячейки армирования;
- обеспечение заданного уровня адгезионной связи между наполнителем и матрицей, а также между матричными слоями;
- сохранение целостности и исходной прочности наполнителя за счет выбора состава КМ и режимов компактирования;
- возможность последующей сварки, пайки или клепки деталей. Чаще всего для выполнения этого требования полуфабрикаты изготавливают со специальными концевыми переходными элементами.

Основные способы получения препретов, полуфабрикатов и изделий из КМ с металлическими матрицами представлены в табл. 12.18.

### 12.18. Способы получения полуфабрикатов и изделий из металлических КМ

Способы производства изделий и полуфабрикатов КМ	Сущность способа	Примеры композиций
Парогазофазные	Нанесение из газовой фазы барьерных слоев, технологических покрытий или металлических матричных слоев на волокна, жгуты, частицы	Покрытия из карбидов, боридов, нитридов, карбонильных металлов на волокнах бора, углерода, частицах
Химические и электрохимические	Нанесение на наполнители матричных слоев или покрытий из водных и солевых растворов	Покрытия из никеля, меди на углеродных жгутах, лентах, НК SiC
Жидкофазные	Пропитка самопроизвольная или под давлением металлическими расплавами жгутов, лент, порошковых пористых преформ; замешивание дискретных наполнителей в матричные расплавы с последующим литьем; расплавление в литейной форме матричной компоненты в виде порошка или фольги, размещенной между наполнителем; плазменное, электродуговое, газоплазменное напыление матриц на наполнители для получения ленточных полуфабрикатов; пайка полуфабрикатов	Алюминиевые сплавы с волокнами бора, углерода, SiC; алюминиевые сплавы с частицами Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, C, TiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Твердофазные	Горячее прессование, сварка давлением (диффузионная, взрывом) композиционных порошковых смесей, плазменных и фольговых полуфабрикатов; экструзия, прокатка, волочение спеченных и литых КМ	Магниевые, алюминиевые сплавы с волокнами углерода, бора; алюминиевые, магниевые сплавы с частицами SiC, C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiC, B <sub>4</sub> C; алюминиевые сплавы со стальной проволокой
Твердо-жидкофазные	Спекание, прессование композиционных порошковых смесей, плазменных полуфабрикатов в режимах контактного плавления	Al – Ni – C; Al – Cu – C; Al – Si – C; Al – Ni – Si – C

#### 12.5.4. СВАРКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

Качество сварных соединений естественных КМ, или композиционных сплавов, определяется в первую очередь возможностью сохранения структуры и механических или специальных свойств в зоне сварки. Исходя из этого необходимо проанализировать возможные варианты трансформации структуры изготовленных специальными методами композиционных сплавов в условиях сварки, воспользовавшись классификацией по межфазовому взаимодействию составляющих сплавы компонентов при плавлении и кристаллизации.

В соответствии с этой классификацией к первому классу относятся КМ, компоненты которых при плавлении образуют однородную жидкость с ограниченной растворимостью, а в твердом состоянии практически нерастворимы друг в друге. В этот класс входят такие композиты, как Fe – Cu, Al – Be, Ti – Mg и др. При плавлении и кристаллизации таких сплавов в шве получается однородная гетерогенная структура с чередующимися участками матрицы и упрочнителя. Сварка плавлением подобных сплавов не ведет к существенному разупрочнению шва по сравнению с самим КМ.

Второй класс составляет КМ, компоненты которых при расплавлении и кристаллизации обладают ограниченной или неограниченной взаимной растворимостью. К этому классу относятся такие материалы, как Nb – W, Ni – W, Al – Si, Co – Cr и др. При сварке КМ с неограниченной растворимостью компонентов в шве будут образовываться твердые растворы с плавно изменяющейся от линии сплавления концентрацией. Прочность шва будет соответствовать прочности твердых растворов. При сварке материала с ограниченной растворимостью компонентов в шве будет присутствовать наряду с твердыми растворами эвтектика или перетектика – в зависимости от диаграммы состояния. При сварке однонаправленных эвтектик имеется возможность обеспечить в шве направленную кристаллизацию так, чтобы разупрочнение зоны сварного соединения было минимальным.

В третий класс объединены материалы, компоненты которых практически не взаимодействуют при сварке плавлением. Это связано с тем, что у этих материалов при температуре плавления тугоплавкого компонента достигается температура кипения легкоплавкого компонента. В связи с этим равновесия двух жидких фаз не может существовать. К этому клас-

су относятся композиты типа W – Cu, W – Ag, Al – Be – Mg, Mg – Be, Nb – Ga и др. При сварке плавлением таких материалов могут образовываться специфические дефекты и развиваться пористость.

К четвертому классу принадлежат композиции, компоненты которых не смешиваются ни в жидком, ни в твердом состоянии. Опыт сварки КМ с такими диаграммами состояния показывает, что сварное соединение имеет структуру с расслоением и легко разрушается по месту сплавления. К данным материалам относятся Fe – Cu – Pb, Fe – Pb, Al – Pb и др.

Таким образом, все металлические композиционные сплавы можно разбить на «удобные» и «неудобные» для использования в конструкциях, где целесообразна сварка плавлением. Наиболее удобными можно считать КМ, относящиеся ко второму и частично к первому классам рассмотренной классификации. Неудобными являются КМ третьего и четвертого классов. Эти КМ при сварке резко меняют фазовый состав и морфологию, что не обеспечивает нужного качества соединений.

**Технология аргонодуговой сварки.** Аргонодуговой сваркой могут быть сварены практически все КМ, входящие в вышеперечисленные группы естественных металлических композиционных сплавов. Однако при этом следует учитывать возможность образования двух видов дефектов: образования химической и структурной неоднородности в шве и ОШЗ; расслоения компонентов в шве.

Исходя из этого сварку необходимо вести с минимально возможной погонной энергией и при минимальном уровне температуры в ЗТВ. Это позволит сократить размеры участка, где свариваемый металл находится в твердожидком состоянии, свести к минимуму время пребывания металла около условной линии сплавления при высоких температурах, что резко ограничит возможности термической диффузии элемента – упрочнителя в матрице.

Рекомендуется сварку проводить постоянным током на прямой полярности.

Оптимальные режимы сварки стыковых соединений композиционного сплава АБМ-1 (композиция Al – 30 % Be – 5 % Mg) при толщине материала 0,8...3 мм находятся в диапазоне скоростей сварки 2,2...10 мм/с. Если скорость сварки <2,2 мм/с, наблюдается неудовлетворительное формирование шва, а при скорости сварки >10 мм/с в сварных швах образуются продольные трещины.

Для сокращения перегрева в ОШЗ рекомендуется сварку проводить с применением медных теплоотводов, расположаемых в непосредственной близости от линии сплавления сварного шва.

Существенно влияет на качество сварных соединений защита зоны сварки от окисления. Одним из методов защиты является автоматическая сварка в камере с контролируемой атмосферой аргона. Перед заполнением аргоном камера вакуумируется.

Однако при изготовлении крупногабаритных изделий и при необходимости ручной сварки используют местную струйную защиту зоны сварки аргоном с расходом газа до 10 л/ч.

Корень шва необходимо также защищать аргоном с расходом газа до 5 л/ч.

Сварка без присадочной проволоки позволяет получить прочность соединения на уровне 0,6...0,7 прочности основного металла. Для достижения равнопрочности шва и основного металла используют метод сварки с присадочной проволокой.

Режимы сварки пластин толщиной 2,0 мм из сплава АБМ-1 с присадочной проволокой представлены в табл. 12.19.

Типичные механические свойства и ударная вязкость  $a_h$  сварных соединений сплава АБМ-1, выполненных без присадки, приведены в табл. 12.20, а при сварке с присадкой – в табл. 12.21.

### 12.19. Режимы сварки пластин из сплава АБМ-1 с присадочной проволокой

Толщина свариваемого материала, мм	Состав проволок	Режим сварки				Характеристики вольфрамовых электродов	
		Сила тока, А	Длина дуги, мм	Скорость сварки, мм/с	Скорость подачи проволоки, мм/с	Угол заточки, °	Притупление, мм
2,0	Св-АМг6	265	1,2	6,6	1,8	60	1,5
	АМБ-1	280			1,5		2,0

### 12.20. Механические свойства сварных соединений сплава АБМ-1, выполненных без присадки

Толщина листа, мм	Основной металл			Сварное соединение		
	$\sigma_b$ , МПа	$a_h$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\alpha$ , °	$\sigma_b$ , МПа	$a_h$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\alpha$ , °
0,8	500	–	80	325	–	100
1,2	480		50	340		
1,5	470		45	330		60
2,0	450	0,8		335	1,6	55
3,0	420	0,5	30	340	1,55	40

### 12.21. Механические свойства сварных соединений сплава АБМ-1, полученных сваркой с присадкой

Толщина листа, мм	Материал присадки	Сварное соединение			
		$\sigma_b$ , МПа (с выпуклостью)	$\sigma_b$ , МПа (без выпуклости)	$a_h$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\alpha$ , °
1,2	Св-АМг6	440	365	–	50
2,0	АБМ-1		370	1,7	60
2,5	–		375	1,0	35
3,0		420		1,6	40

**Технология электронно-лучевой сварки (ЭЛС).** Сварка концентрированными источниками энергии, такими как электронный и лазерный лучи, наиболее рациональна при соединении металлических композиционных сплавов, упрочненных частицами.

Основные трудности, возникающие при сварке электронным лучом, связаны в интенсивным испарением из зоны сварки летучих компонентов композиций, таких как магний, литий, цинк и др. В условиях вакуума, который практически всегда сопровождает ЭЛС, интенсивное испарение этих элементов при соответствующем содержании их в композиции приводит к образованию дефектов внешнего формирования в виде выбросов расплавленного металла из объема сварочной ванны. Устранить или предупредить образование этих дефектов можно выбором рациональных приемов и режимов сварки.

Варьирование режимами сварки дефектов в виде выбросов полностью не устраивает. В связи с этим необходимо использовать специальные приемы сварки, направленные на увеличение размеров и времени существования сварочной ванны, перемешивание расплава и искусственное снижение летучих элементов в зоне сварочной ванны.

Наиболее эффективными приемом, увеличивающим время существования и размер сварочной ванны, а также обеспечивающим интенсивное перемешивание расплава, является сварка с колебаниями луча, которые можно

легко осуществлять подачей на отклоняющую электромагнитную систему сварочной электронно-лучевой пушки импульсов определенных частоты и амплитуды, генерируемых источниками электрических сигналов. При этом необходимо использовать как продольные (вдоль направления сварки) колебания, так и поперечные.

Для снижения концентрации легкоиспаряющихся компонентов в зоне сварки применяют промежуточные вставки, которые размещают между свариваемыми кромками перед сваркой. В дальнейшем эти вставки переплавляют вместе с основным металлом, изменяя тем самым химический состав в зоне воздействия электронного луча.

Наилучшие результаты для наиболее сложных материалов достигаются при совместном использовании продольно-поперечных колебаний луча и промежуточных вставок.

КМ, в составе которых нет легкоиспаряющихся элементов, удовлетворительно свариваются электронным лучом и без указанных выше приемов.

В табл. 12.22 представлены режимы ЭЛС некоторых КМ.

ЭЛС применяется для изделий, габаритные размеры которых оптимальны для размещения в вакуумных камерах относительно небольших размеров, а толщина свариваемых материалов  $>10\ldots15$  мм. Во всех других случаях более эффективна аргонодуговая или лазерная сварка.

12.22. Режимы ЭЛС некоторых КМ

Материал (об. доля, )	Толщина мате- риала, мм	Мате- риал про- кладки	Тол- щина про- кладки, мм	Режим колебаний				Уско- ряющее напря- жение, кВт	Ток луча, мА	Ско- рость сварки, мм/с			
				продольных		поперечных							
				Частота, Гц	Ампли- туда, мм	Частота, Гц	Ампли- туда, мм						
АБМ-1	2,0			—				60	20	6,0			
	5,0			—					45	5,0			
	10,0	АМг-3	1,0	50	3,0	50	1,5		60	4,0			
50 Fe – 50 Cu	2,0			—				30	30	5,0			
	5,0			—		50	1,5		50				
50 Fe – 40 Cu – 10 Pb	3,0	Никель	0,5	50	3,0		50	40		4,0			

**Технология лазерной сварки.** Лазерная сварка – весьма перспективное направление в технологии обработки КМ. Сочетание высокой концентрации энергии с технологичностью процесса позволяет рекомендовать этот метод сварки для широкого круга материалов различной толщины. Наибольший эффект достигается при использовании мощного излучения ( $>1$  кВт) CO<sub>2</sub>-лазеров. Однако в ряде случаев, например при изготовлении деталей приборов, целесообразно применение твердотельных лазеров небольшой мощности.

При лазерной сварке не наблюдается рассмотренных ранее дефектов типа неоднородности химического состава и выбросов металла из зоны расплава. Однако могут иметь место такие дефекты, как поры и трещины, часто встречающиеся при сварке традиционных металлов и сплавов. Выбор оптимальных режимов сварки и условий проведения процесса позволяет избежать этих дефектов.

Сборка соединения перед сваркой – один из важных элементов технологического процесса. Исходя из особенностей лазерной сварки и свариваемых материалов соединения требуют специальной подготовки кромок, несколько отличающейся от принятой при сварке традиционных материалов.

Перед сваркой кромки стыковых соединений должны быть отфрезерованы либо отшлифованы. После механической обработки необходимо удалить заусенцы налипниками или резиновыми абразивными кругами. Для очистки поверхности детали от жировых загрязнений и пыли после зачистки металлическими щетками и тонкой наждачной бумагой рекомендуется протирать кромки свариваемых изделий растворителями. Непосредственно перед сваркой следует обезводить кромки этиловым спиртом для предотвращения попадания влаги в место сварки.

Допустимые зазоры после сборки сварного соединения, не влияющие на прочность сварных соединений, должны составлять 0,1 мм для толщин 1...2 мм и 0,15...0,2 мм для толщин 3...5 мм.

Сварка практически всех материалов невозможна без использования защиты сварочной ванны от окисления. Образование оксидов вызывает появление ГТ. В качестве защитного газа можно использовать чистый гелий или его смесь с азотом, а также небольшие добавки аргона (до 20 %). При этом корень шва и осты-

вающий металл поверхности шва защищают чистым аргоном во избежание окисления и ухудшения свойств сварного соединения. Применять чистый аргон для защиты сварочной ванны недопустимо, так как в этом случае под действием лазерного луча над поверхностью образца образуется облако плотной плазмы, практически не пропускающей лазерное излучение.

Характерной особенностью зависимости глубины проплавления от режимов сварки для концентрированных источников в сравнении с дуговыми является увеличение проплавляющей способности для более теплопроводных материалов: меди, алюминия, титана и др. Погонная энергия при сварке концентрированными источниками почти на порядок ниже, чем при сварке дуговыми источниками. Это показывает целесообразность применения к материалам с высокой температуропроводностью концентрированных источников нагрева. При этом достигается большая проплавляющая способность при меньшей вкладываемой погонной энергии, что благоприятно сказывается на уменьшении остаточных деформаций в изделии.

При лазерной сварке материалов, содержащих несмешиваемые при плавлении и кристаллизации компоненты с концентрацией превышающей критические значения, возможно образование дефектов в виде расслоений в металле шва составляющих компонентов. Так, для системы Fe – Cu – Pb с массовой долей свинца  $>2,5$  % в шве наблюдается изменение морфологии компонентов КМ. Компоненты располагаются чередующимися слоями железной фазы и медно-свинцовой эвтектики. Прочность таких сварных соединений составляет 10...12 % прочности основного материала. Разрушение идет по линии сплавления, на границе изменения строения КМ.

Для устранения дефекта такого вида следует легировать шов компонентами, уменьшающими расслоение в нем. В частности, для композиции (в %) 50 Fe – 40 Cu – 10 Pb рекомендуют прокладки из никеля. Сборку соединения при этом надо проводить с плотным прижатием кромок небольшим усилием, чтобы избежать появления зазоров в стыке.

Механические свойства сварных соединений, полученных лазерной сваркой композиций Fe – Cu и Fe – Cu – Pb, приведены в табл. 12.23.

### 12.23. Механические свойства сварных соединений, полученных лазерной сваркой

Материал (об. доля, %)	Метод сварки	$\sigma_b$ , МПа	$a_h$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\alpha, {}^\circ$	$\delta, \%$	Примечания
50 Fe – 50 Cu	–	600	7,0	140	6,0	До сварки
50 Fe – 50 Cu	Лазерная	590	6,6	120		Сварка без присадки
60 Fe – 40 Cu	–	700	6,0	140	6,5	До сварки
60 Fe – 40 Cu	Лазерная	650	5,0	100		Сварка без присадки
50 Fe – 40 Cu – 10 Pb	–	400	3,0	120	–	До сварки
50 Fe – 40 Cu – 10 Pb	Лазерная	160	2,0	80		Сварка со вставкой алюминия
50 Fe – 40 Cu – 10 Pb		380	2,8	70		Сварка со вставкой никеля
50 Fe – 30 Cu – 20 Pb	–	350	2,5	100	–	До сварки
50 Fe – 30 Cu – 20 Pb	Лазерная	140	2,0	70		Сварка со вставкой алюминия
50 Fe – 30 Cu – 20 Pb		340	2,5	65		Сварка со вставкой никеля

#### 12.5.5. СВАРКА ВОЛОКНИСТЫХ И ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ КМ

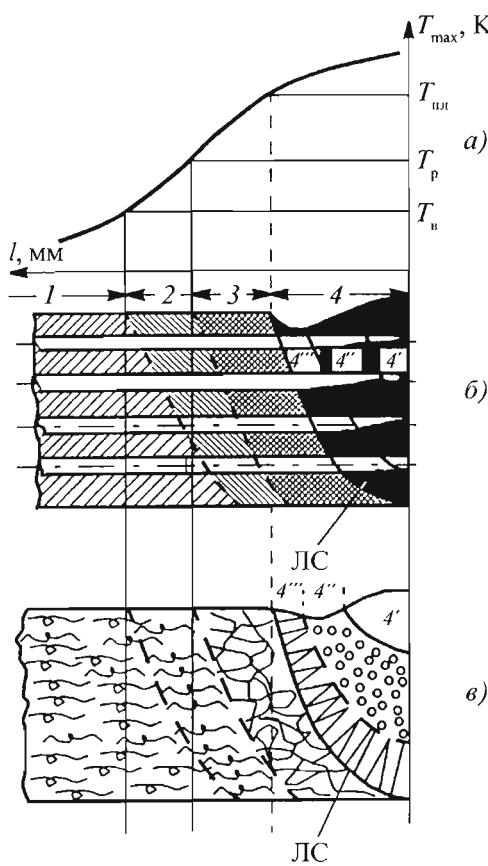
Искусственные металлические КМ, содержащие высокопрочные высокомодульные армирующие волокна или частицы, следует отнести к трудносвариваемым материалам. Тому имеется несколько причин.

I. Сварка КМ осуществляется соединением материала матрицы. Армирующий наполнитель или полностью отсутствует в сварном шве (например, встыковых соединениях, расположенных поперек или вдоль направления армирования волокнистых КМ), или существует в уменьшенной объемной доле либо при измененном распределении армирующей фазы (например, при сварке плавлением дисперсно-наполненных КМ). Нарушение непрерывности и кода армирования в зоне сварки снижает прочность соединения по сравнению с основным КМ и должно быть учтено при конструировании изделий из КМ.

Известны предложения по так называемой автономной сварке КМ для сохранения непрерывности армирования (например, сварка давлением вольфрамовых волокон в композиции вольфрам – медь с последующим заполнением стыка медным расплавом). Такая сварка требует специальной подготовки кромок, строгого соблюдения шага армирования и пригодна лишь для КМ, армированных металлическими волокнами. Другое предложение состоит в подготовке стыковых соединений с перекрытием

волокон на длине больше критической, однако при этом возникают трудности с заполнением стыка матричным материалом и обеспечением прочной связи по границе волокно – матрица.

II. В условиях сварочного нагрева проблема физико-химической и термомеханической совместимости компонентов формулируется не менее остро, чем при производстве КМ. Влияние сварки на структурные изменения в КМ можно рассмотреть на примере соединения, образующегося при проплавлении дугой волокнистого КМ поперек направления армирования (рис. 12.1). Если металл матрицы не обладает полиморфизмом (например, алюминий, магний, медь, никель и др.) то в соединении можно выделить четыре основные зоны: 1 – зона, нагреваемая ниже температуры возврата матрицы (по аналогии со сваркой обычных материалов этот участок может быть назван основным); 2 – зона, ограниченная температурами возврата и рекристаллизации металла матрицы (зона возврата); 3 – зона, ограниченная температурами рекристаллизации и плавления матрицы (зона рекристаллизации); 4 – зона нагрева выше температуры плавления матрицы (сварной шов). Если матрицей в КМ являются сплавы титана, циркония, железа и других металлов, имеющих полиморфные превращения, то в зонах 3 и 4 появятся подзоны с полной или частичной фазовой перекристаллизацией матрицы.



**Рис. 12.1. Распределение максимальных температур в зоне сварки плавлением поперек направления движения сварочного источника (а) и структурные изменения в волокнистом (б) и дисперсно-наполненном (в) КМ:**  
ЛС – линия сплавления

Изменения свойств КМ начинаются в зоне 2. Здесь процессы возврата снимают деформационное упрочнение матрицы, достигнутое при компактировании КМ, понижают уровень напряжений и стабилизируют структуру межфазных границ. Вследствие некоторого разупрочнения матрицы прочностные характеристики КМ в этой зоне могут снизиться, но незначительно.

В зоне 3 происходят рекристаллизация и рост зерен металла матрицы. Возможно дальнейшее развитие межфазного взаимодействия, начало которому было положено в процессе производства КМ, увеличивается толщина хрупких прослоек и ухудшаются свойства КМ в целом. При сварке плавлением КМ, полученных методами твердофазного компактирования

порошков или препретов с порошковой или напыленной матрицей, появляется пористость по границам сплавления и примыкающим к ним межфазным границам, ухудшаются не только прочностные свойства, но и герметичность сварного соединения.

В зоне 4 (сварном шве) можно выделить три участка:

- участок 4', примыкающий к оси шва, где вследствие сильного перегрева под дугой матричного расплава и большой длительности контакта наполнителя с расплавом полностью растворяется армирующая фаза;

- участок 4'' характеризуется более низкой температурой нагрева расплава и меньшей длительностью контактирования армирующей фазы с расплавом. В результате волокна лишь частично растворяются в расплаве;

- участок 4''', где нет заметного изменения размеров армирующей фазы, но на межфазных границах образуются островки или прослойки из хрупких продуктов взаимодействия, прочность армирующей фазы снижается.

При сварке плавлением дисперсно-наполненных КМ в сварном шве удается сохранить формирующий наполнитель, однако он заметно перераспределяется в результате оттеснения фронтом растущей твердой фазы при кристаллизации сварочной ванны.

Таким образом, сварной шов при сварке плавлением КМ становится зоной максимального повреждения.

III. Из-за различия в коэффициентах термического расширения (КТР) наполнителя и матрицы в сварных соединениях КМ возникают напряжения, вызывающие разрушение хрупких фаз и растрескивание сварных соединений.

IV. Введение в матрицу тугоплавких армирующих наполнителей повышает вязкость композиционного расплава, что отрицательно сказывается на однородности распределения армирующих фаз и формировании сварного шва при сварке плавлением.

V. Армирующий наполнитель ухудшает тепло- и электропроводность металлической матрицы КМ, что затрудняет его соединение сваркой сопротивлением (контактной точечной или шовной).

VI. При сварке КМ с монолитными сплавами необходимо учитывать различие не только КТР, но и теплофизических свойств. Результатом этих различий является несимметричность изотерм сварки. Такие соединения сваривают со смещением источника тепла со стыка, применяют различную теплоотводящую

оснастку и жесткие приспособления, уменьшающие коробление.

Приемлемый уровень свойств сварных соединений КМ может быть достигнут следующими способами.

1. Из известных методов соединения следует отдать предпочтение методам сварки давлением, при которых вследствие меньшей подводимой энергии можно достичь минимальной деградации свойств компонентов КМ в зоне соединения.

2. Режимы сварки давлением должны быть выбраны так, чтобы уменьшить смещение или дробление армирующего компонента.

3. При сварке плавлением КМ нужно предпочесть способы и режимы, обеспечивающие минимальное тепловложение в зону соединения.

4. Сварку плавлением следует рекомендовать для соединения КМ с совместимыми компонентами, например для композиций на базе легких сплавов, содержащих керамические частицы с барьерными покрытиями.

5. Электродный или присадочный материал или материал промежуточных прокладок для сварки плавлением должен содержать легирующие добавки, ограничивающие растворение армирующего компонента и образование хрупких продуктов межфазного взаимодействия в процессе сварки и при последующей эксплуатации сварных узлов. Например, при сварке КМ систем Al – SiC, Al – C целесообразно применение присадок с большим содержанием кремния, при сварке КМ Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – присадок с добавками магния.

6. При сварке дисперсно-наполненных КМ для достижения равнопрочности соединений имеет смысл применять присадки, содержащие соответствующие керамические частицы.

Волокнистые и слоистые КМ чаще всего соединяют внахлестку. Поскольку передача нагрузки в нахлесточном сварном или паяном соединении осуществляется через матрицу, существенно уступающую по прочности армирующему наполнителю, для обеспечения высокой прочности соединений применяют большие перекрытия: отношение длины перекрытия к толщине материала обычно >20. Такие соединения могут быть дополнительно усилены заклепочными или болтовыми соединениями. Наряду с нахлесточными соединениями возможно выполнение стыковых и угловых сварных соединений в направлении армирования и реже – поперек направления армирования

ния. В первом случае при правильном выборе способов и режимов сварки возможно достижение равнопрочности соединения; во втором случае прочность соединения обычно не превышает прочность матричного материала.

КМ, армированные частицами, короткими волокнами, НК, могут быть свареныстык. Равнопрочность таких соединений основному КМ достигается при выборе соответствующих способов и режимов сварки, а также сварочных материалов и при условии, что КМ изготовлены методами жидкофазной технологии. Если для изготовления КМ применены методы порошковой металлургии, то в зоне сварки возможно образование участков повышенной пористости (например, у границы сплавления), и прочность таких соединений снижается.

**Дуговая сварка в защитных газах** – широко применяемый метод сварки плавлением КМ с матрицами из химически активных металлов и сплавов (алюминия, магния, титана, никеля, хрома). Стандартное сварочное оборудование оснащают дополнительными устройствами для газовой защиты зоны сварки от контакта с воздухом. В качестве защитного газа используют аргон высшего сорта (ГОСТ 10157–73) или смесь аргона с гелием. Сварку осуществляют неплавящимся электродом от источника постоянного тока на прямой полярности или от источника переменного тока (для разрушения оксидной пленки катодным распылением, если матрица – из сплавов алюминия) с присадкой или без нее или плавящимся электродом на обратной полярности. Для расширения возможностей регулирования теплового воздействия сварки целесообразно применение импульсной, сжатой или трехфазной дуги.

**Электронно-лучевая сварка.** Преимущества метода – в отсутствии окисления и вакуумной дегазации композиционного расплава, высокой концентрации энергии в пучке, позволяющей получить соединения с минимальной шириной зоны плавления и ОШЗ (последнее особенно важно при выполнении соединения волокнистых КМ в направлении армирования). Для уменьшения количества продуктов межфазного взаимодействия в зоне шва рекомендуется проведение процесса при минимальных погонных энергиях. При специальной подготовке соединений возможна сварка с использованием присадочных простоявок.

**Сварка лазером.** Из-за преимущественного поглощения энергии лазера керамическим армирующим наполнителем велика опасность его растворения в сварочной ванне и образования хрупких продуктов взаимодействия (на-

пример карбидных фаз  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ,  $\text{Al}_4\text{SiC}_4$  в сварных швах КМ Al – SiC). Другие трудности при сварке КМ лазером состоят в обеспечении высококачественной сборки соединения, удовлетворительного формирования шва, уменьшении пористости. Для защиты зоны сварки от окисления применяют гелий или смесь гелия с азотом; корень шва можно защищать аргоном.

**Контактная сварка.** Наличие армирующей фазы в КМ снижает его тепло- и электропроводность по сравнению с материалом матрицы и препятствует формированию литого ядра. При точечной контактной сварке дисперсно-наполненных КМ наблюдают перераспределение армирующего наполнителя, увеличение объемной доли частиц по периферии литой линзы и уменьшение в центре. Этую неоднородность связывают с эффектом центрифуги (плотность алюминиевого расплава, частиц  $\text{SiC}$  и  $\text{Al}_2\text{O}$  соответственно 2,7; 3,2 и 3,97 г/см<sup>3</sup>).

При сварке листов различной толщины или листов из КМ с монолитными листами для того, чтобы вывести ядро сварной точки в плоскость соприкосновения листов и сбалансировать разницу в электропроводности материалов, подбирают электроды с разной проводимостью, с обжатием периферийной зоны, изменяют диаметр и радиус закругления электродов, толщину пластифицирующего слоя, применяют дополнительные прокладки. Так, при шовной сварке КМ системы Al – SiC рекомендуют использовать прокладки толщиной 0,5 мм из сплавов Al – 3 % Mg, Al – 12 % Si.

**Диффузионная сварка.** Процесс проводят при высоком давлении без припоя с нагревом до температур, близких к температуре плавления матрицы, но ниже ее. Так, детали из боралюминия сваривают в герметичном контейнере при температуре 482 °C, при давлении до 20 МПа и выдержке в течение 30...90 мин. Известны варианты диффузионной сварки давлением дисперсно-наполненных КМ систем алюминиевые сплавы/частицы  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$  с использованием промежуточных слоев из меди, серебра, сплавов Al – Li или через жидкую фазу с использованием фольги из сплавов меди, цинка, серебра.

**Сварка трением.** В зоне соединения дисперсно наполненных КМ наблюдаются обычно абразивное разрушение армирующих частиц, интенсивная пластическая деформация матрицы и рост твердости; в ЗТВ сварки – снижение твердости в результате отжига матричного сплава. Для достижения равнопрочности соединения алюминиевых КМ целесообразна последующая термообработка соединений по режиму старения.

**Клинопрессовая сварка.** Для соединения законцовок из обычных конструкционных сплавов с трубами или корпусами из КМ разработан способ сварки разнородных металлов, резко отличающихся по твердости, который можно назвать микроклинопрессовым. Давление впрессовывания создается путем термических напряжений, возникающих при нагреве оправки и обоймы приспособления для термокомпрессионной сварки, выполненных из материалов с различными КТР. Элементы законцовок, на контактную поверхность которых нанесена клиновая резьба, собирают с трубой из КМ, а также с оправкой и обоймой. Собранные приспособление нагревают в защитной среде до температуры 0,7...0,9 от температуры плавления наиболее легкоплавкого металла. Оправка приспособления имеет больший КТР, чем обойма. В процессе нагрева расстояние между рабочими поверхностями оправки и обоймы сокращается и выступы («клинья») резьбы на законцовке впрессовываются в пакетировочные слои трубы. Прочность соединения не ниже прочности матричного или пакетировочного металла.

**Сварка взрывом** применяется для соединения листов, профилей и труб из КМ, армированных металлическими волокнами или слоями, имеющими достаточно высокие пластические свойства, чтобы избежать дробления армирующей фазы, а также для соединения КМ с законцовками из различных металлов и сплавов. Прочность соединений обычно равна или даже выше (за счет деформационного упрочнения) прочности наименее прочного матричного материала, применяемого в соединяемых деталях. Для повышения прочности соединений используют промежуточные прокладки из других материалов. В соединениях обычно нет пор или трещин. Возможно присутствие в переходной зоне оплавленных участков, особенно при сварке взрывом разнородных металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышова Т.А., Кобелева Л.И., Шебо П., Панфилов А.В. Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями. М.: Наука, 1993. 272 с.
2. Авраамов Ю.С., Шиганов И.Н., Шляпин А.Д. Сварка и модификация поверхности металлических композиционных материалов. М.: ГИНФО, 2002. 120 с.
3. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. Т. 2 / Под ред. А.И. Акулова. М.: Машиностроение, 1978. 464 с.

## Г л а в а 13

# ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 13.1. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

#### 13.1.1. ПРИМЕНЕНИЕ СОЧЕТАНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Разнородными принято считать стали, которые отличаются атомно-кристаллическим строением, т.е. имеют гране- и объемно-центрированные кристаллические (ГЦК-, ОЦК)-решетки или принадлежат к разным структурным классам (перлитные, ферритные, аустенитные), а также стали с однотипной решеткой, относящиеся к различным группам по типу и степени легирования (низколегированные, легированные, высоколегированные). Они содержат в сумме до 5; 10 или >10 % Cr и других легирующих элементов соответственно. В табл. 13.1 приведены основные группы сталей, применяемые в машиностроении. Из них формируют различные сочетания для изготовления сварных конструкций разного назначения.

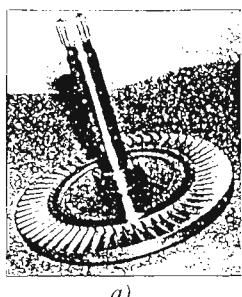
Конструкции, сваренные из разнородных сталей, называют комбинированными. Они применяются в тех случаях, когда условия работы отдельных частей конструкции отличаются температурой, агрессивностью среды, особыми механическими воздействиями (износ, знакопеременное нагружение и т.п.). Если изготовление всей конструкции из стали со специальными свойствами нецелесообразно по технико-экономическим показателям, при проектировании предусматривают комбинированный вариант, а при производстве разрабатывают и применяют специальную технологию сварки заготовок из разнородных сталей или поверхностную наплавку отдельных частей требуемым составом. Пример комбинированных сварных конструкций приведен на рис. 13.1, а характеристики их составляющих – в табл. 13.2.

#### 13.1. Классификация сталей, применяемых в сварных соединениях разнородных сталей

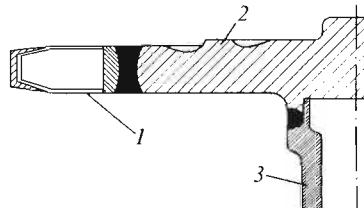
Класс сталей и сварочных материалов	Группа стали	Характеристика сталей	Марки (примеры)
Перлитные и бейнитные	I	Низкоуглеродистые	Ст3, сталь 20
	II	Низколегированные конструкционные	09Г2С, 10ХСНД, 20ХГСА
	III	Низколегированные среднеуглеродистые	30ХГСА, 40Х, 40ХН2МА, 38ХФ
	IV	Жаропрочные (Cr – Mo и Cr – Mo – V)	15XM, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф
	V	Криогенные	ОН3, ОН6, ОН9
Мартенситные, ферритные, ферритно-мартенситные, аустенитно-мартенситные, ферритно-аустенитные	VI	12%-ные хромистые, коррозионностойкие	08Х13, 12Х13
	VII	Высокохромистые, жаростойкие	12Х17, 15Х25Т, 14Х17Н2
	VIII	12%-ные хромистые, жаропрочные	15Х11НМФ, 5Х12ВНМФ
	IX	Хромоникелевые коррозионностойкие	08Х21Н5Т

Окончание табл. 13.1

Класс сталей и сварочных материалов	Группа стали	Характеристика сталей	Марки (примеры)
Аустенитно-ферритные и аустенитные стали и сплавы на никелевой основе	X	Кислотостойкие и криогенные с $\delta$ -Fe	12X18H10T, 10X17H13M3Т
	XI	Аустенитные жаропрочные	X15H35ВТ, 20Х25Н20С2
	XII	Аустенитные коррозионно-стойкие и криогенные	X18H20, X13АГ19, 06Х23Н28М3Д3Т
	XIII	Жаропрочные никелевые сплавы	XН67ВМТЮ, XН70МФ



a)



б)

Рис. 13.1. Внешний вид (а) и эскиз (б) сварного ротора газовой турбины транспортного двигателя:  
1 – литьй венец из особо жаропрочного никелевого сплава; 2 – кованый фланец из никелевого сплава;  
3 – вал из стали 12Х1МФ

### 13.2. Свойства конструкционных сталей и сплавов

Характеристика	Тип стали (сплава)			
	Ст3	18-8	25-20	20-80
Температура плавления, °C	1500	1400...1425	1383...1410	1390
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °C)	0,42	0,50		0,45...0,63 (в интервале 100...900 °C)
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · K)	40,3	16,3	12,6...16,8	12,2 (при 100 °C)
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/°C при нагреве: от 0 до 100 °C	12,0	17,3	15,0	11,7
от 0 до 500 °C	13,4	18,5	18,0	13,5
Электросопротивление при 20 °C, Ом · мм <sup>2</sup> /м	0,15	0,73		1,24
Температура начала интенсивного окалинообразования, °C	820	1100...1150	1406	1300
Предел прочности:				
прочности	$\geq 380$	$\geq 550$	$\geq 600$	$\geq 1000$
текучести	$\geq 210$	$\geq 200$	$\geq 300$	$\geq 600$

### 13.1.2. СВАРИВАЕМОСТЬ РАЗНОРОДНЫХ СОЧЕТАНИЙ СТАЛЕЙ

Свариваемость, т.е. пригодность сталей к формированию высококачественных сварных соединений, является комплексной характеристикой, включающей в себя показатели технологической [стойкость против образования горячих и холодных трещин (ГТ и ХТ)] и эксплуатационной прочности. Неоднородность различного типа, присущая сварным соединениям рассматриваемого вида, а также ее изменение во времени обусловливают зависимость их эксплуатационной прочности от времени и температуры. Поэтому свариваемость разнородного сочетания неадекватна ее составляющим и требует решения ряда дополнительных самостоятельных проблем с применением специальной технологии сварки.

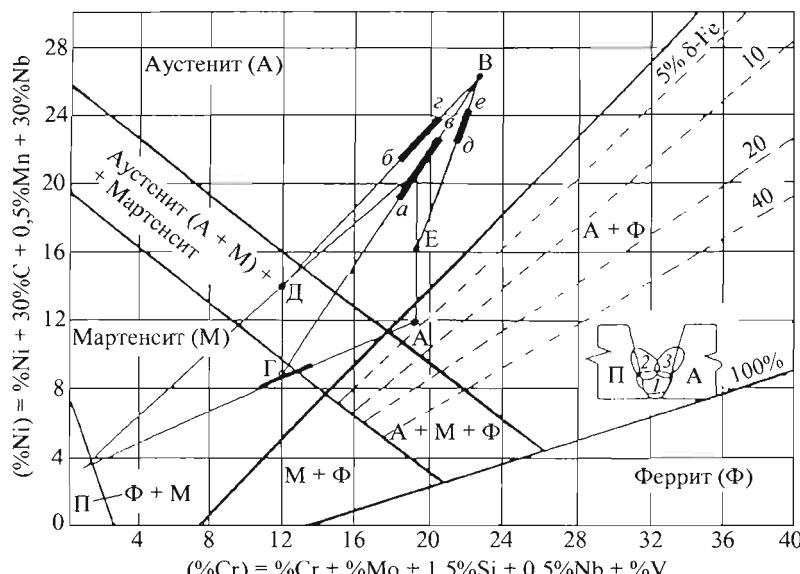
Они вызваны существенными различиями  
стадей по:

- химическому составу;
  - по коэффициентам линейного расширения;
  - температуре плавления и теплофизическими свойствами;

– температуре фазовых и структурных превращений.

Это приводит к получению швов аномального химического состава, которые принципиально отличаются от каждой из свариваемых сталей: по механическим свойствам, их стабильности, склонности к закалке и структурным изменениям при нормальных и рабочих температурах в процессе эксплуатации.

Так, при сварке и наплавке сочетаний различных сталей, представленных в табл. 13.1, происходит смешивание в различных пропорциях (см. табл. 13.2) перлитной стали с аустенитной или ферритной либо ферритной с аустенитной. Получаемый при этом химический состав шва имеет промежуточные значения и различную структуру, оцениваемую по эквивалентам хрома и никеля на диаграмме Шеффлера (рис. 13.2). Металлу шва, соответствующему области А, свойственна однофазная аустенитная структура, весьма склонная к образованию ГТ кристаллизационного и подсолидусного типов. Шов со структурой А + Ф, т.е. с аустенитно-ферритной структурой, при повторных нагревах претерпевает охрупчивание в результате превращения феррита в сигма-фазу ( $\delta\text{-Fe} \rightarrow \sigma$ ).



**Рис. 13.2. Схема определения структуры в корне шва и отдельных слоях многопроходного шва с помощью диаграммы Шеффлера и данных табл. 13.3. Точки П и А характеризуют структуру перлитной и аустенитной сталей соответственно, точка Г – структуру при перемешивании сталей П и А в соотношении 0,4/0,6, а отрезок  $a-b$  – состав корня шва, полученного с участием электрода (точка В) при колебании его доли в шве. Точки Д и Е – соответствуют структуре слоев 2 и 3 без участия электрода, а отрезки  $b-c$  и  $d-e$  описывают структуру слоев шва 2 и 3 соответственно с участием электрода состава точки В**

Для швов со структурой Ф (феррит) характерны рост зерна при высоких температурах и хрупкость при нормальных. Швы со структурами М, М + А, М + Ф, М + А + Ф имеют мартенситную составляющую, вызывающую образование ХТ. Это осложняет обеспечение свариваемости при сварке разнородных сочетаний, так как различные дефекты возникают не только в шве, но и в ОШЗ сочетаний каждой стали.

Неоднородность химического состава сварного соединения, сложившаяся после его кристаллизации, вызывает внутренние напряжения, их концентрацию в отдельных зонах с пониженной прочностью, что приводит к локальным разрушениям соединения или снижению его антакоррозионных свойств.

Высокотемпературная эксплуатация сварных соединений инициирует развитие диффузионных процессов, способствующих перемещению отдельных атомов в более стабильные с термодинамических позиций положения, что влечет за собой образование хрупких и малопрочных прослоек, понижение их длительной прочности, коррозионной стойкости и агрегатной прочности всего соединения.

Специальная технология сварки позволяет свести к минимуму указанные негативные явления путем управления формированием структуры при сварке сталей в разнородных сочетаниях. При выборе сварочных материалов и режимов сварки применяют качественные и количественные методы оценки сопротивляемости образованию ГТ и ХТ по ГОСТ 26388–84 и 26389–84.

### 13.1.3. СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В ШВЕ И ОШЗ

Наиболее сложно формирование зоны сплавления перлитной и аустенитной сталей. Оно имеет место во многих вариантах комбинированных конструкций и отличается несколькими особыми явлениями:

- различным объемом расплавляемых заготовок при образовании ванны, что зависит от теплофизических свойств свариваемых сталей;

- различием температур плавления сталей и шва, приводящим к перегреву в ОШЗ стали с пониженной температурой плавления теплотой кристаллизации металла шва, затвердевающего при более высокой температуре;

- формированием переходной, «криSTALLизационной» прослойки аномального состава при зарождении кристаллитов в сварочной ванне;

- нестабильностью соединения, в котором продолжаются диффузионное перераспределение углерода к другим карбидообразующим элементам при высоких температурах и формирование зоны переменных состава и структуры;

- образованием после охлаждения закаленных слоев и внутренних напряжений между слоями вследствие их различных теплофизическých свойств; созданием химической, структурной и механической неоднородностей в сварном соединении.

#### 13.1.3.1. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ВАННЫ

При формировании сварочной ванны неодинаковы доли участия аустенитной и перлитной сталей. Они обусловлены различиями в температуре их плавления, теплопроводности и теплоемкости (см. табл. 13.2). Как правило, аустенитная и перлитная стали составляют 60 и 40 % объема шва соответственно в условиях равногого теплового воздействия.

При затвердевании первых слоев металла возникает кристаллизационная прослойка, которая образуется из расплавленных объемов свариваемых частей, перемешанных турбулентными потоками в ванне. Кристаллизация имеет направленный характер и начинается на оплавленных зернах перлитной и аустенитной сталей, играющих роль теплоотводов и плоских зародышей. Их рост осуществляется по принципу ориентационного и размерного соответствия путем единичного или группового оседания атомов жидкости во впадинах кристаллической решетки зародышей, что обеспечивает связь шва с основным металлом. При этом различна роль легирующих элементов, входящих в состав ванны. Элементы-ферритизаторы (хром, титан, молибден), атомный объем которых больше, чем железа, способствуют росту кристаллитов с ОЦК-решеткой, а аустенитизаторы (углерод, никель, азот, марганец) – с ГЦК-решеткой. Последняя имеет более плотную упаковку и большие размеры, отличается от ОЦК-решетки скоростью и направлением роста. Это приводит к преимущественному оседанию одних атомов и отталкиванию других. В результате избирательного роста перед передними гранями растущих кристаллитов концентрируются в жидком слое инородные атомы, что приводит к останову роста, переохлаждению жидкого слоя, прымывающего к межфазной поверхности, и зарождению кристаллитов с решеткой другого типа. На рис. 13.3 представлена микроструктура зоны сплавления

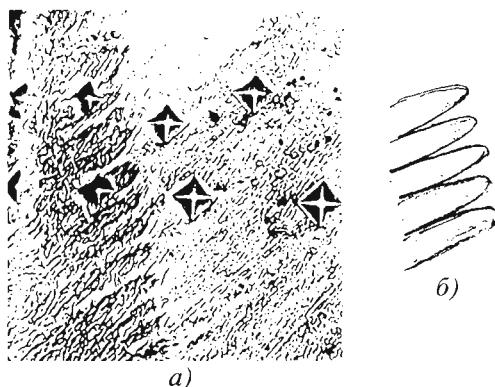


Рис. 13.3. Микроструктура зоны сплавления перлитной стали 30Н4МФДА с аустенитным швом 08Х20Н9Г7Т (шов с правой стороны), увеличение 600<sup>×</sup> (а) и схема роста кристаллитов в зоне сплавления (б)

перлитной стали с аустенитным швом, подтверждающая этот механизм. Столбчатые кристаллиты перлитной стали постепенно прекращают свой рост в аустенитном металле. При этом в зоне сплавления образуется «кристаллизационная» прослойка, т.е. промежуточный слой сопрягающихся между собой деформированных кристаллических решеток. Так, в зоне сплавления перлитной и аустенитной сталей участок кристаллизационной прослойки с содержанием 3...12 % Cr и 2...7 % Ni имеет особую структуру высоколегированного мартенсита.

Толщина переходных кристаллизационных прослоек изменяется от 0,05 до 0,6 мм в зависимости от скорости охлаждения шва, а также от степени его аустенитности. Чем выше концентрация никеля в шве, тем раньше стабилизируется аустенитная структура с ГЦК-решеткой и тоньше переходная кристаллизационная прослойка от перлитной стали к аустенитной (рис. 13.4).

Основной объем затвердевшего металла шва имеет однородный состав, отличающийся от прослойки. Его конечная структура оценивается с помощью структурных диаграмм Шеффлера, Делонга, Потака и Сагалевича. Пример такого применения диаграммы Шеффлера приведен на рис. 13.2. Структура перлитной стали I2Х1МФ соответственно ее эквивалентным значениям элементов – ферритизаторов и аустенитизаторов характеризуется точкой П, а аустенитная 08Х18Н10Т – точкой А. С учетом их расплавления в соотношении 0,4/0,6 металл шва будет иметь структуру

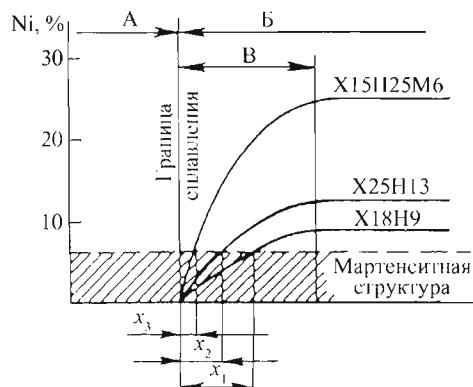


Рис. 13.4. Схема определения ширины хрупких кристаллизационных прослоек в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом в зависимости от содержания никеля в шве:  
А, Б – свариваемые элементы;  
В – ширина зоны переменного состава;  
 $x_1 - x_3$  – толщина мартенситной прослойки, содержащей 7 % Ni

мар滕сита или аустенитно-мар滕ситную (точка Г), состоящую из кристаллов с ОЦК- и ГЦК-решетками. Такой металл хрупок и весьма склонен к ХТ, что недопустимо. Повторный нагрев шва при термообработке, выполнении последующих слоев или высокотемпературной эксплуатации приведет к распаду мар滕сита, выпадению карбидов хрома и формированию аустенитно-карбидной структуры, также отличающейся малой пластичностью. Применением плавящегося электрода или присадки изменяют долю участия сталей (см. табл. 1.8) и регулируют структуру шва. Той же цели служит разделка кромок или их предварительная наплавка с регламентированным составом. При электронно-лучевой сварке также возможно регулирование состава шва применением легирующих накладок, подкладок или подачей проволочной присадки в зону сваривания.

### 13.1.3.2. ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Наибольшее значение в обеспечении прочности и надежности сварного соединения имеют специфические процессы, развивающиеся после кристаллизации шва в ОШЗ. Они связаны с тем, что при перемешивании сталей с высокой ( $T_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ ) и низкой ( $T_{пл} = 1400^{\circ}\text{C}$ ) температурой плавления металл шва имеет промежуточную температуру плавления и затвердевания, но более высокую, чем для одной

из свариваемых сталей. Это приводит к тому, что на свариваемую сталь после дугового нагрева, оплавляющего кромки и заполняющего сварочную ванну жидким металлом, при затвердевании шва воздействует теплота перегрева выше ликвидуса, а также скрытая теплота кристаллизации, выделяемая из металла шва. Это вызывает дополнительное локальное расплавление основного металла, который не может участвовать в турбулентном перемешивании ванны из-за высокой вязкости кристаллизующегося шва у стенок ванны.

Нагрев стенок ванны влечет за собой преимущественное оплавление границ зерен, их обогащение по законам восходящей диффузии из объемов зерен легирующими элементами и примесями в связи с повышенной растворимостью элементов в жидкой фазе. Последующая кристаллизация таких межзеренных прослоек обособленно от ванны создает микрорхимическую неоднородность в ОШЗ, негативно влияющую на сопротивляемость ГТ и ХТ, жаропрочные и коррозионные свойства сварного соединения средне- и высоколегированных сталей. Снижение такого перегрева может быть обеспечено металлургическими и технологическими средствами. Последнее достигается вводом в ванну внешних и внутренних стоков теплоты, применением электродов с высоким содержанием никеля, снижающим температуру плавления металла шва и сварочной ванны.

После образования кристаллической решетки по всему сечению шва доминирующее значение приобретают диффузионные процессы в твердой фазе, протекающие по двум противоположным законам: выравниванию химического состава и восходящей диффузии, обусловленной химическим сродством элементов друг к другу. Последнее приводит к тому, что углерод, имеющий малый диаметр атома и большую скорость диффузии, дифундирует в зоны, где его концентрация максимальна, но имеются малоподвижные карбидообразующие элементы. Главное значение в этом процессе имеет скорость диффузии отдельных элементов в объемах с ГЦК- и ОЦК-решетками. При всех температурах диффузионная подвижность углерода в Fe- $\alpha$  заметно выше, чем в более плотноупакованной решетке Fe- $\gamma$ , а коэффициент диффузии углерода в Fe- $\alpha$  выше, чем в Fe- $\gamma$ , при 900; 755 и 500 °С соответственно в 39; 126 и 835 раз. Диффузионная подвижность

других легирующих элементов, образующих твердые растворы замещения, значительно меньше и проявляется лишь при температуре >1000 °С.

Такое соотношение приводит к обеднению углеродом перлитной стали и его сосредоточению в прилегающих слоях аустенитной стали, содержащей много хрома. Это создает условия для закалки металла и последующего образования карбидов хрома. Три фактора управляют завершенностью этого процесса: температура, время пребывания при высоких температурах и концентрация свободного углерода. Процесс начинается в условиях сварки и получает существенное развитие при повторных нагревах, при термообработке и высокотемпературной эксплуатации. Он приводит к образованию диффузионных обезуглероженных прослоек со стороны перлитной стали и в аустенитной, обогащенной углеродом. Кинетика роста толщины прослоек в соответствии с закономерностями диффузионного процесса определяется экспоненциальной зависимостью от температуры и квадратической от времени выдержки. В координатах  $\lg \delta(T)$  и  $\delta(\sqrt{t})$  рост толщины прослоек  $\delta$  отображается прямыми линиями. Результатом их развития является создание зон переменных состава, структуры и твердости.

Наиболее заметны результаты этих процессов при измерении твердости в поперечном сечении сварного соединения (рис. 13.5). При этом обнаруживается зона переменной твердости с минимумом в обезуглероженном слое перлитной стали и максимумом в аустенитной стали в результате диффузии углерода к малоподвижным атомам хрома. Характер изменения твердости имеет три разновидности в зависимости от степени аустенитности стали (см. рис. 13.5). При малом значении  $Cr_{\text{экв}}/Ni_{\text{экв}}$  значения твердости имеют ниспадающий характер, а ширина зоны переменной твердости минимальна. При увеличении  $Cr_{\text{экв}}/Ni_{\text{экв}}$  растет ширина этой зоны. Максимуму  $Cr_{\text{экв}}/Ni_{\text{экв}}$  соответствует экстремальный характер изменения твердости. В том же порядке увеличивается склонность к появлению ХТ, образующихся по первым слоям аустенитного металла шва, претерпевающим закалку. ХТ такого вида получили название «отрыв», что в макромасштабе подразумевает отрыв аустенитного шва от перлитной стали (рис. 13.6). В закаленной ЗТВ перлитной стали образуются ХТ типа «котокол» и «частокол».

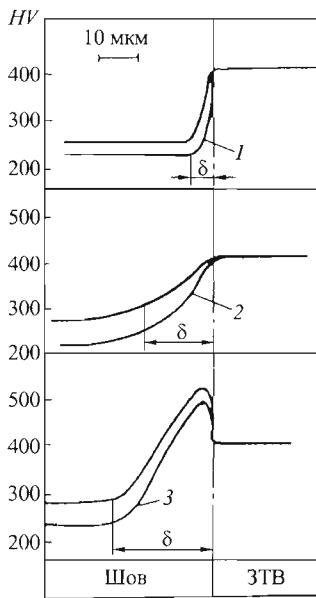


Рис. 13.5. Распределение микротвердости в зоне сплавления среднелегированной Cr – Ni – Mo стали с аустенитным швом, полученным аустенитными сварочными проволоками с различным соотношением  $\text{Cr}_{\text{жв}} / \text{Ni}_{\text{жв}}$ :  
1 – Св-09Х16Н25М6АФ,  $\text{Cr}_{\text{жв}} / \text{Ni}_{\text{жв}} = 0,8$ ;  
2 – Св-04Х19Н11М3,  $\text{Cr}_{\text{жв}} / \text{Ni}_{\text{жв}} = 1,8$ ;  
3 – 08Х19Н9Ф2С2,  $\text{Cr}_{\text{жв}} / \text{Ni}_{\text{жв}} = 2,2$

Принято считать, что минимизация ширины зоны переменной твердости до 0,15...0,25 мкм позволяет устраниить склонность к ХТ. Это объясняется снижением объемного напряженного состояния в сверхтонких закаленных слоях.

Второй негативный результат диффузионного перераспределения элементов состоит в образовании малопрочного обезуглероженного слоя со стороны перлитной стали (рис. 13.7). Наибольшая степень и глубина обезуглероживания наблюдаются при сварке углеродистой

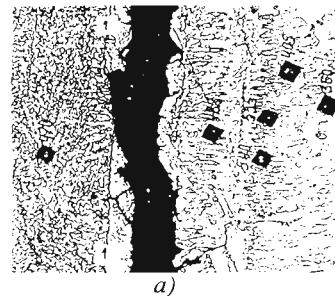


Рис. 13.6. Микроструктура зоны сплавления (линия 1 – 1) перлитной стали П с аустенитным швом А на участке ХТ типа «отрывы», проходящей преимущественно по аустенитной стали (а) и микроструктура центра аустенитного шва с четко выраженной границей зерна на фоне дендритной структуры (б). Увеличение 600<sup>х</sup>

стали, поскольку углерод в такой стали не связан в термостойкие карбиды. Важно отметить, что этот процесс протекает не только при сварке и термообработке, но и при высокотемпературной эксплуатации соединений, что приводит к увеличению его ширины. В обезуглероженном слое при этом укрупняется зерно, падает прочность и возможно разрушение при длительной эксплуатации вследствие развития высокотемпературной ползучести. В легированной стали, где углерод связан в термостойкие карбиды, обезуглероженный слой менее развит.



Рис. 13.7. Обезуглероженный «мягкий» слой в зоне сплавления углеродистой стали с 12%-ным хромистым швом (шов слева, сталь справа). Твердость обратно пропорциональна диагонали лунок, образованных твердомером. Увеличение 600<sup>х</sup>

### 13.1.3.3. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОСЛЕСВАРОЧНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА

На этапе охлаждения сварного соединения после сварки, термообработки или эксплуатации характерно аномальное возникновение напряжений вследствие различия температурных коэффициентов линейного сокращения (рис. 13.8). В аустенитной стали возникают растягивающие напряжения, так как она имеет значительно большее уменьшение объема по сравнению с перлитной (см. табл. 13.2). Поэтому эпюры остаточных напряжений при сварке перлитной стали перлитными или аустенитными сварочными материалами принципиально отличаются. Эти напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как разрушения, так и изменения размеров конструкции во времени. Нецелесообразность термообработки соединений с аустенитным швом обусловлена развитием диффузионных процессов обезуглероживания и окрупчивания отдельных зон соединения, а для швов с аустенитно-ферритным швом – окрупчивание шва в результате перехода ферритной фазы в хрупкую  $\sigma$ -фазу. Лишь для швов, эксплуатируемых при высоких температурах и в агрессивных средах, необходимы (см. гл. 10) аустенитизация ( $1150^{\circ}\text{C}$ ) и стабилизация ( $850^{\circ}\text{C}$ ). Напротив, для соединений с перлитным низколегированным швом, а также для швов с мартенситно-ферритным швом требуются подогрев и отпуск для предотвращения ХТ и повышения пластичности металла.

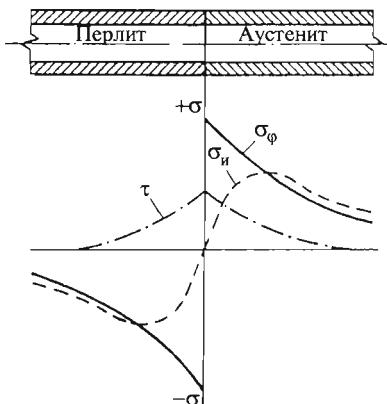


Рис. 13.8. Распределение остаточных напряжений в сварном стыке труб из разнородных сталей после отпуска при  $650^{\circ}\text{C}$ :

$\sigma_{\phi}$  – окружные;  $\sigma_i$  – изгибающие;  
 $\tau$  – касательные напряжения

При этом режимы термообработки назначают по наиболее легированной стали, входящей в разнородное сочетание.

Таким образом, сварные соединения разнородных сталей могут иметь значительную изменяющуюся во времени химическую, структурную и механическую неоднородности, наиболее сильно выраженные при сварке перлитной стали с аустенитной или наплавке.

Минимизация указанных видов неоднородности и обеспечение свариваемости достигаются обоснованным выбором сварочных материалов, способов и режимов сварки и термической обработки с учетом жесткости соединений, температуры эксплуатации и агрессивности среды.

### 13.1.4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ

#### 13.1.4.1. ВЫБОР СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ

Одна из причин пониженной свариваемости сочетания перлитной и аустенитной сталей – образование хрупкого мартенситного слоя или карбидной гряды в объеме переходной кристаллизационной прослойки, у которой уровень легирования металла снижается, приближаясь к перлитной стали. Образование этой прослойки объясняется ухудшением перемешивания жидкого металла в пристеночных слоях. При небольшом запасе аустенитности металла шва толщина этой прослойки может достигнуть критической величины, при которой происходит хрупкое разрушение сварного соединения.

Поэтому при выборе способов и режимов сварки отдают предпочтение технологиям, при которой толщина кристаллизационной прослойки минимальна. Этого достигают следующими методами: применением высококонцентрированных источников тепла (электронный луч, лазер, плазма); разделкой кромок или их наплавкой (рис. 13.9), уменьшающей долю участия сталей; выбором режимов сварки с минимальной глубиной проплавления, переходом к дуговой сварке в защитных газах, обеспечивающей интенсивное перемешивание металла ванны.

Преимущества сварки комбинированных конструкций в защитных газах связаны с повышением температуры расплавленного металла, снижением поверхностного натяжения и, соответственно, интенсивности его перемещения, что вызвано ростом приэлектродного

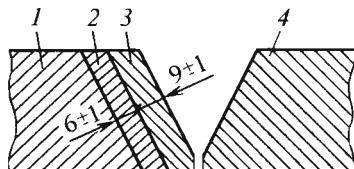


Рис. 13.9. Схема комбинированной наплавки свариваемой кромки:

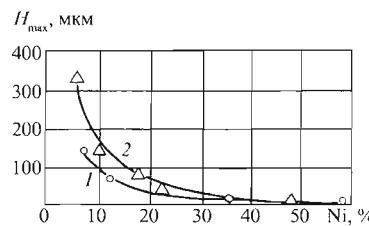
1 – углеродистая сталь; 2 – перлитный стабилизированный слой; 3 – аустенитный слой; 4 – аустенитная сталь

падения напряжения сварочной дуги и увеличением кинетической энергии переноса капель электродного металла и плазменного потока в дуге.

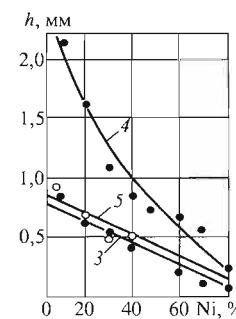
Добавление в аргон кислорода, азота, углекислого газа усиливает отмеченные преимущества. Добавки кислорода повышают температуру ванны также тем, что вызывают экзотермические окислительно-восстановительные реакции. В результате отмеченных явлений снижается уровень структурной и механической неоднородности в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом.

При ручной дуговой сварке положительные результаты получают в противоположном варианте, т.е. при снижении температуры сварочной ванны, что зависит от температуры плавления металла шва. Это достигают увеличением никеля и марганца в составе электрода, снижающим температуру его плавления. Применение таких электродов является наиболее радикальным мероприятием и при сварке под флюсом, одновременно уменьшающем ширину кристаллизационных и диффузионных прослоек (рис. 13.10).

При сварке под флюсом перемешивание ванны также может быть активизировано увеличением силы тока, напряжения или скорости сварки. Однако рост этих параметров приводит к неблагоприятному изменению схемы кристаллизации (увеличению угла срастания кристаллитов), что повышает риск образования ГТ. Скорость сварки, как правило, не должна превышать 25 м/ч. Интенсивному электромагнитному перемешиванию ванны препятствует наличие шунтирования магнитного поля перлитной сталью, а также нарушение шлаковой защиты. В этом процессе весьма эффективен ввод внутренних стоков теплоты в виде охлаждающей присадки (рис. 13.11), также снижающей температуру ванны.



а)



б)

Рис. 13.10. Снижение толщины кристаллизационных (а) и диффузионных (б) прослоек в зоне сплавления стали 20 и стали 12Х18Н10Т при увеличении содержания никеля в металле шва:

1 – без подогрева; 2 – подогрев до 500 °C;  
3 – обезуглероженная прослойка в углеродистой стали, подогрев до 550 °C, выдержка 1000 ч;  
4 – то же, подогрев до 650 °C; 5 – науглероженная прослойка в аустенитном шве, подогрев до 650 °C, выдержка 1000 ч

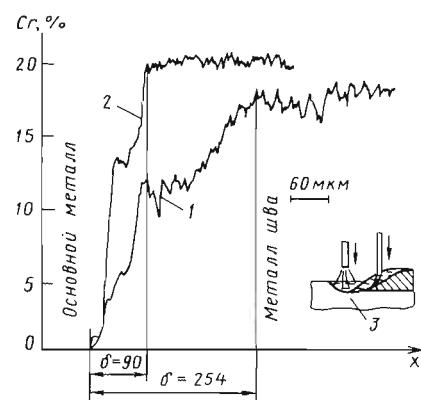


Рис. 13.11. Уменьшение толщины слоя переменного состава  $\delta$  при вводе в ванну внутренних стоков теплоты в виде охлаждающей присадки при сварке под флюсом стали 30Н4МФДА при равном расходе электрода и присадки типа Св-08Х20Н9Г7Т:

1 – сварка без присадки;  
2 – сварка с присадкой по схеме 3

#### 13.1.4.2. ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При сварке перлитных сталей с аустенитными максимальны все виды неоднородностей. Выбор сварочных материалов должен исключить образование трещин различных видов и обеспечить эксплуатационную надежность сварных соединений. Применяют аустенитные сварочные материалы, позволяющие получить композиции наплавленного металла с таким запасом аустенитности, чтобы компенсировать участие в шве перлитной стали и гарантированно обеспечить в высоколегированном шве или наплавке аустенитную структуру (см. табл. 1.8). Применив в корневом слое I электрод типа X15H25 с высоким запасом аустенитности (точка В на диаграмме) в соотношении 50/50 к указанному выше расплаву, можно получить требуемый металл шва со структурой аустенита: отрезок *a* – *b* (см. рис. 13.2).

При формировании слоя 2 со стороны перлитной стали в нем участвуют основной металл (точка П) и корень шва (отрезок *a* – *b*), образуя ванну состава точки Д, а также входящий в нее электрод (точка В), что в сумме создает металл слоя со структурой *b* – *g*, соответственно долей их участия. Аналогично слой 3 со стороны аустенита характеризуется отрезком *e* – *d*.

Большой запас аустенитности металла шва позволяет предотвратить образование малопластичных участков с мартенситной или карбидной структурой в корне шва и слоях, примыкающих к перлитной стали в условиях неизбежного колебания долей их участия. Однако в этом случае будет характерна высокая склонность к возникновению ГТ в однофазном аустенитном металле шва, образующихся по границам зерен, сформированных в результате миграции (см. рис. 13.6, б). Для их предотвращения в швах со стабильно аустенитной струк-

турой наплавленный металл легируют элементами, снижающими диффузионные процессы при высоких температурах, т.е. применяют электроды типа X15H25AM6, содержащие 6 % Mo и 0,2...0,3 % N<sub>2</sub>. Они препятствуют развитию высокотемпературной ползучести и межзеренного проскальзывания в твердом металле при сварке, повышая при этом пластичность в температурном интервале хрупкости, а значит предотвращают образование ГТ. Более сложный вариант технологии необходим при сварке жестких узлов из аустенитной и средненеуглеродистой стали мартенситного класса, когда в корневых слоях из-за разбавления до 50 % возможно образование ГТ, а в верхних слоях – ХТ типа «отрыв» и «откол». В этом случае корневые слои выполняют электродами, содержащими до 60 % Ni и 15 % Mo.

Указанные электродные материалы с однофазной аустенитной структурой шва применяют и при сварке перлитных сталей с термоупрочняемыми жаропрочными аустенитными сталью и никелевыми сплавами.

В большинстве таких случаев при сварке перлитных и термически неупрочняемых аустенитных сталей группы IX применяют другой – аустенитно-ферритный электрод, образующий в наплавленном металле 10...12 % ферритной фазы и допускающий до 30 % долю участия перлитной стали в металле шва. При смешивании материала электрода и расплава в том же соотношении будет получен шов, содержащий 4...6 % дельта-феррита, что исключит образование ГТ, но несколько увеличит толщину кристаллизационной прослойки. Такой вариант технологии допустим при сварке аустенитных сталей с перлитными (группы II – III), содержащими активные карбидообразователи для ограничения диффузии углерода, либо весьма малое количество углерода, что

### 13.3. Выбор композиции наплавленного металла и термообработки для сварки сочетаний перлитных, мартенситных и ферритных сталей с аустенитными сталью и сплавами

Группы свариваемых сталей (см. табл. 13.1)	Предельная температура эксплуатации, °C	Композиция наплавленного металла	Термическая обработка
I + X – XII	350	Э-11Х15Н25М6АГ2	Не требуется
II + X – XII	400	Э-27Х15Н25В3Г2Б2Т	Отпуск
III + X – XII		Э-08Х15Н60Г7М7Т	
IV + X – XIII	580	Э-08Х14Н65М15В4Г2	Не требуется
V + X – XII	<650	Э-08Х14Н65М15В4Г2	Не требуется

достигается его частичной заменой азотом. Для сварных узлов, эксплуатирующихся при высоких температурах, необходимо применение высоконикелевых электродов (типа ХН60М15), швы которых хорошо работают в условиях теплосмен из-за равенства коэффициента линейного расширения с перлитной сталью (см. табл. 13.2). Этими электродами заваривают дефекты литья сталей групп IV и V без последующей термообработки.

При недостаточности или неприемлемости указанных технологических вариантов прибегают к сварке через простоянки или к предварительной, в том числе комбинированной (см. рис. 13.9) наплавке кромок перлитной стали аустенитным металлом с последующей сваркой таких заготовок аустенитно-ферритными сварочными материалами с регламентированным количеством  $\delta\text{-Fe}$  (2...6 %).

При сварке кислотостойких и жаропрочных высокохромистых ферритных сталей (группа VIII) с аустенитными (группы XI – XIII) принципиально возможно применение как аустенитных, аустенитно-ферритных, так и высокохромистых электродов, поскольку при перемешивании в ванне указанных сталей с электродным металлом при доле его участия до 40 % металл шва сохраняет такую же структуру, как и у наплавленного указанными электродами. В случае температур эксплуатации  $>500$  °С предпочтительны высокохромистые электроды. При эксплуатации в условиях термоциклирования необходимо сваривать указанные сочетания сталей аустенитными электродами на никелевой основе, поскольку их коэффициент линейного расширения близок с высокохромистой сталью. Для удовлетворения требований жаростойкости шва следует применять электроды с высоким содержанием хрома (25...27 %) и никеля (12...14 %), что позволяет их эксплуатировать при 1000 °С.

При неагрессивных рабочих средах соединения упомянутых сталей, подвергаемые термообработке, могут быть выполнены электродами типа X15H25AM6, которые допускают значительное перемешивание с основным металлом без образования ГТ. Если термообработка невозможна, рекомендуется облицовка кромок закаливающихся сталей электродами на никелевой основе.

Еще один вариант технологии предусматривает предварительную наплавку на перлитную закаливающуюся сталь аустенитного

слоя, при которой проводится предварительный или сопутствующий подогрев, обеспечивающий необходимую скорость охлаждения, с последующим отпуском для устранения закалки. После этого детали из перлитной стали с наплавленными кромками сваривают с аустенитной сталью на режимах, оптимальных для последней согласно рекомендациям, данным в гл. 7 – 9.

Во всех случаях сварки разнородных сталей важным параметром процесса является уровень водорода в шве, зависящий от длины дуги и температуры прокалки электродов. Водород вызывает пористость швов и способствует развитию зародышей всех указанных выше типов ХТ в закаленных зонах. Поэтому необходимо применять низководородистые электроды с основным покрытием и флюсы на фтористо-кальциевой основе.

Другое сочетание сталей разнородных структурных классов в сварных конструкциях – сварка перлитных и высокохромистых сталей. При сварке перлитных сталей с 12%-ными хромистыми сталью необходимо предотвратить образование мартенсита и ХТ, а также развитие диффузионных прослоек при отпуске и высокотемпературной эксплуатации. При выборе сварочных материалов следует исключить образование хрупких переходных участков в зонах перемешивания сталей. Для обеспечения наибольшей пластичности шва применяют сварочные материалы перлитного класса (табл. 13.4). В этом случае в переходных участках со стороны высоколегированной стали, содержащих до 5 % Cr, сохраняются высокая пластичность, вязкость, а также длительная прочность соединения в целом. Для снижения размеров диффузионных прослоек перлитный наплавленный металл должен легироваться определенным количеством более активных, чем хром, карбидообразующих элементов. При сварке деталей больших толщин целесообразно электродами типа Э-ХМ делать наплавку на кромки высоколегированной стали, а разделку заполнять без подогрева электродами типа Э-42 или Э-50 в зависимости от требований прочности перлитного шва. Температуру предварительного подогрева и отпуска определяют по характеристикам более легированной, т.е. 12%-ной хромистой стали, но для уменьшения размеров диффузионных прослоек применяют отпуск при минимально допустимой температуре.

### 13.4. Выбор композиции наплавленного металла и термообработки для сварки сочетания перлитных сталей с мартенситными, ферритными и аустенитно-ферритными

Группы свариваемых сталей (см. табл. 13.1)	Предельная температура, °C	Композиция наплавленного металла	Температура отпуска, °C
I, II + VI, VIII	300...350	Хромомолибденовая (Э-09Х1М, Св-08ХГСМА, Св-08ХМ)	Подогрев, отпуск 650...680
I, II + VII	300	Э-08Х24Н6ТАМФ	700...740
III, IV + VII		Э-10Х25Н13Г2	
IV + VI, VIII	400...450	Э-09Х1МФ, Св-08ХМФА	650...700

При сварке перлитных сталей с более высоколегированными хромистыми сталью группы VII, содержащими 17...28 % Cr, применяют электроды аустенитно-ферритного, а также аустенитного класса. Однако при этом следует учитывать вышеописанную структурную неоднородность в зоне сплавления аустенитного шва и перлитной стали. Термообработка в этом случае не требуется.

#### 13.1.5. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ОДНОГО СТРУКТУРНОГО КЛАССА

Перлитные стали, отличающиеся лишь легированием, сваривают электродами, применяемыми для менее легированной стали, если к швам не предъявляется требований повышенной прочности или особых свойств жаропрочности, коррозионной стойкости, характерных для более легированной. Однако технологические режимы сварки и температуру подогрева

следует выбирать (рассчитывать) применительно к более легированной стали. Рекомендации по сварке различных групп перлитных сталей в пределах одного класса приведены в табл. 13.5.

При невозможности подогрева при сварке производят наплавку кромок более легированной стали с подогревом электродами типа Э-42А. Толщина наплавленного слоя должна быть достаточной, чтобы более легированная сталь не нагревалась до температур  $A_{\text{c}1}$ , т.е. чтобы не создавались условия для закалки.

При сварке различных сочетаний высокочромистых мартенситных (с 12 % Cr), ферритных (с 28 % Cr) и ферритно-аустенитных сталей типа X21Н5 выбор сварочных материалов и технологий должен исключить образование ХТ и хрупких участков в швах. Режим подогрева назначают по наиболее закаливающейся стали, с немедленным отпуском, без полного охлаждения. Для этого применяют сварочные

### 13.5. Выбор композиции наплавленного металла и термообработки для сварки разнородных перлитных сталей

Группы свариваемых сталей (см. табл. 13.1)	Композиция наплавленного металла	Температура эксплуатации, °C	Термическая обработка, °C
I + II	Низкоуглеродистая	$\pm 60$	Не требуется
I + III, I + V			Отпуск 630...650
III + III	Низколегированная	$\pm 60$	Не требуется
	Аустенитная на железной основе		
I + IV	Низкоуглеродистая	До 350	Не требуется
	Хромомолибденованадиевая	До 450	Отпуск 670...700
V + V	Аустенитная на железной основе	-(50...100)	Отпуск 620
	Аустенитная на никелевой основе	>-100	Не требуется

материалы ферритно-аустенитного класса, сварку с минимальной погонной энергией, так как высокохромистые стали в ЗТВ весьма склонны к росту зерна, приводящему к охрупчиванию соединения. После окончания термообработки необходимо ускоренное охлаждение для предотвращения 475-градусной хрупкости (см. гл. 9). Возможна также сварка аустенитными электродами. Однако при этом термообработка не снимает полностью сварочные напряжения из-за различия в коэффициентах линейного расширения шва и основного металла. Рекомендации по выбору композиций наплавленного металла и термообработки при сварке высокохромистых сталей приведены в табл. 13.6.

При выборе материалов для сварки аустенитных сталей различного легирования главное требование – исключить образование ГТ кристаллизационного и подсолидусного типов (см. рис. 13.6, б), а также не допустить локальных разрушений и снижения коррозионной стойкости. Сварку сталей с малым запасом аустенитности проводят электродами (табл. 13.7), обес-

печивающими в шве 4...6 % ферритной фазы. Однако при сварке различных стабильно-аустенитных коррозионно-стойких сталей, как правило, не допускается в швах наличие ферритной фазы. Необходимо применять сварочные материалы, обеспечивающие получение швов с однородной аустенитной структурой без ГТ, что достигается легированием молибденом, марганцем и азотом, например Св-04Х15Н25М6Г2АФ. Для сварки аустенитных сталей, обладающих особо высокой жаропрочностью (до 1000 °C), применяют электроды, дающие наплавленный металл с аустенитно-боридной или аустенитно-карбидной структурой, образующейся при высоком содержании в шве углерода, ниobia и титана или бора. Термообработка сварных соединений указанного типа проводится только при необходимости снятия остаточных сварочных напряжений. Этого достигают стабилизацией при 800...850 °C. Если конструкция предназначена для работы при высоких температурах, то предпочтительна аустенитизация при температуре 1100...1150 °C.

### 13.6. Выбор композиции наплавленного металла для сварки высокохромистых сталей

Группы свариваемых сталей	Композиция наплавленного металла	Условия эксплуатации	Термическая обработка
VI + VIII	Мартенситно-ферритная на базе 12 % Cr	До 500 °C	Отпуск
	Аустенитно-ферритная	До 400 °C	Не требуется
VI + VII	Мартенситно-ферритная на базе 12 % Cr	В корродирующих средах до 350 °C	Отпуск
VI + IX	Ферритно-аустенитная	До 350 °C	Не требуется

### 13.7. Выбор композиции наплавленного металла для сварки аустенитных сталей и сплавов на никелевой основе

Группы свариваемых сталей	Композиция наплавленного металла	Температура эксплуатации, °C	Термическая обработка
X + X	Аустенитно-ферритная	≤500	Не требуется
X + XI	Аустенитная	>500	Аустенитизация
			Аустенитизация + стабилизация
X + XII		≤500 в корродирующих средах	Не требуется
X (XI) + XIII	На никелевой основе	≤650	Аустенитизация + стабилизация

### 13.2. СВАРКА СТАЛИ С АЛЮМИНИЕМ

Алюминий с железом способны давать твердые растворы, интерметаллидные соединения ( $\text{Fe}_2\text{Al}_4$  – 62,93 % Al;  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  – 54,71 % Al;  $\text{FeAl}_2$  – 49,13 % Al;  $\text{FeAl}$  – 32,57 % Al и др.) и эвтектику ( $\text{Al} + \text{FeAl}_3$ ,  $T_{\text{пл}} = 654$  °C, массовая доля железа в металле 1,8 %). Растворимость железа в твердом состоянии ограничивается 0,053 % при эвтектической температуре. Растворимость алюминия в железе порядка 32 %, т.е. в 600 раз выше. При затвердевании в структуре сплавов алюминия и железа выпадают кристаллы соединения  $\text{FeAl}_5$  (59,18 %).

Для условий сварки характерно появление  $\text{FeAl}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Они обладают низким пределом времененного сопротивления (15...17 МПа). Твердость  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}_3$  и  $\text{FeAl}_2$  лежит в диапазоне  $\mu_r = 9600...11\,500$  МПа. С увеличением содержания железа и повышением температуры твердость снижается. Для  $\text{Fe}_3\text{Al}$   $\mu_r = 2700$  МПа. Разупрочнение  $\text{FeAl}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  начинается при температуре 0,45  $T_{\text{пл}}$ . Для  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  характерно аномально высокое значение удельного электрического сопротивления.

Интерметаллиды химически стойки. Последующая термическая обработка соединений может привести только к росту протяженности зоны интерметаллидов. В соединении имеют место три характерных участка: железо (сталь), интерметаллидная зона, алюминий (алюминиевый сплав). Механические свойства соединений зависят от промежуточной зоны: ее состава, количества интерметаллидов, их формы, протяженности, характера расположения и сплошности.

На алюминии образуется химически стойкая тугоплавкая оксидная пленка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $T_{\text{пл}} = 2047$  °C), что при сварке плавлением может привести к дефекту в виде включений этой пленки в металл шва. Использование флюсов не дает положительных результатов: флюсы для сварки алюминия легкоплавки, жидкотекучи, плохо смачивают стали; флюсы для стали активно реагируют с расплавленным алюминием.

Характер диффузионных процессов при сварке давлением алюминия с железом и сталью на начальной стадии взаимодействия и в дальнейшем отличается. В начальный период имеет место диффузия железа в алюминий. В результате в пограничной зоне образуется слой из смеси фаз  $\text{FeAl}_3 + \text{Fe}_2\text{Al}_5$ . Далее при

температуре, соответствующей рекристаллизации стали, наблюдается интенсивная диффузия алюминия в сталь. Скорость этого процесса зависит от химического состава материала контактирующих заготовок и условий нагрева.

Для твердофазного взаимодействия при определенных температурно-временных условиях сварки может отсутствовать непрерывный фронт интерметаллидов. Подобная картина наблюдается на биметалле A6 + армко-железо, полученном прокаткой при температуре 560 °C со степенью обжатия 60 %. После отжига при температуре рекристаллизации армко-железа в течение 0,5...44 ч появляется непрерывный слой интерметаллидов.

Анализ результатов отжига биметалла томами высокой частоты (время нагрева 8...10 с) говорят о том, что образование слоя совпадает с появлением первых участков рекристаллизации в железе. Повышение температуры и времени выдержки интенсифицирует количество образующихся интерметаллидов. Слой состоит из  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  и имеет вид серии длинных «языков», вытянутых в сторону стальной заготовки (столбчатые кристаллы, имеющие блочную структуру). Реакционная диффузия в системе алюминий – железо наблюдается при температуре >400 °C. Рост интерметаллидного слоя подчиняется параболическому закону:

$$y^2 = 2k_1\tau,$$

где  $k_1$  – величина, пропорциональная коэффициенту диффузии алюминия через слой;  $\tau$  – время роста, с.

Легирование материалов алюминиевой заготовки кремнием, марганцем и другими элементами, а стали – ванадием, титаном, кремнием и никелем повышает энергию активации реакционной диффузии. Их влияние связано с затруднением образования зародышей в промежуточной фазе. Противоположное влияние оказывают углерод и марганец в стали. Повышенное содержание в определенных пределах в стали свободного кислорода и азота ведет к росту температуры начала образования интерметаллидов. Возникновение интерметаллидного слоя для каждой температуры начинается после некоторого критического времени, т.е. имеет место латентный период  $\tau_0$ , по прошествии которого интенсивно образуются интерметаллиды. Его зависимость от температуры можно записать так:

$$\tau_0 = 6,0 \cdot 10^{-13} \exp(192,3 / RT),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная.

При ведении процесса в твердожидком состоянии (с расплавлением алюминия) со стороны железа (стали) образуется  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , а со стороны алюминия –  $\text{FeAl}_3$ .

При сварке хромоникелевых коррозионно-стойких сталей с алюминиевыми сплавами интерметаллидная прослойка носит более сложный характер, и в ее образовании участвуют хром и никель.

Биметаллическое соединение обладает удовлетворительными механическими свойствами лишь до образования непрерывного слоя интерметаллидной фазы. Работоспособность соединения сохраняется при определенном температурно-временном воздействии. Верхний температурный порог для биметаллических изделий из рассматриваемого сочетания материалов составляет 500...520 °C.

После охлаждения биметаллического соединения возникают значительные остаточные напряжения из-за различия в коэффициентах теплового расширения. Алюминиевые сплавы и стали имеют значительные различия в температурах плавления, теплопроводности и теплопрочности.

Основными путями получения работоспособного соединения алюминиевых сплавов со сталью являются:

- ограничение протяженности слоя интерметаллидных прослоек (высокая прочность может быть получена при ширине зоны ≤10 мкм);

- легирование алюминия элементами, содержащими образование промежуточной фазы, и прежде всего, кремнием, а также применение стали с низким содержанием углерода и марганца, что позволяет поднять температуру образования интерметаллидов на 40...60 °C выше температуры рекристаллизации стали. Этот путь может быть рекомендован для сварки давлением.

Использование кипящей стали дает возможность проводить рекристаллизационный отжиг металла при 610...630 °C без образования интерметаллидной фазы.

Различия в пластических свойствах и твердости позволяют успешно применять для рассматриваемого сочетания материалов **клинопрессовую сварку** при изготовлении биметаллических стержней, трубчатых переходников и т.п. Температура нагрева стальной

заготовки, имеющей в продольном сечении форму клина, до 500...600 °C. Предусматривают меры по защите стали от окисления. Высокие механические свойства соединения получаются при использовании покрытий из цинка на поверхности клина.

**Диффузионную сварку** ведут при температуре 425...495 °C (время до 10 мин, сварочное давление 210...310 Па). Поверхность заготовки из стали покрывают слоем никеля и вольфрама. Последний с алюминием способен образовывать эвтектику. При этом температура сварки должна быть ниже температуры образования эвтектики.

**Ультразвуковая сварка** позволяет получать нахлесточные, точечные и шовные соединения на тонких заготовках. Колебания подают со стороны алюминия. Толщина алюминия ограничивается величиной порядка 1,0...1,25 мм.

**Сварка трением** дает возможность получать соединения высокого качества, равнопрочные алюминиевому сплаву в отожженном состоянии. В процессе сварки температура в стыке быстро достигает своего максимума и затем стабилизируется. При сварке аустенитной стали 12X18H10T с АД1 продолжительность латентного периода для температуры 660 °C, что близко к развиваемой в стыке, составляет 100...120 с. Продолжительность сварки ~10 с. Поэтому интерметаллидная фаза не успевает образоваться в сколько-нибудь значительных количествах. В то же время непрерывно идущая осадка (главным образом за счет алюминия) способствует получению чистого от интерметаллидов шва (суммарная осадка ~14 мм).

При наличии в алюминиевом сплаве магния продолжительность латентного периода резко сокращается, поэтому алюминиевые магниесодержащие сплавы свариваются на режимах, обеспечивающих температуру в стыке ≤500 °C.

**Сварка взрывом** таких материалов требует применения барьера слоя, который наносится на стальную заготовку. Этим способом получают слоистые листы и ленты.

Широкое применение получила **сварка прокаткой**, которая позволяет регламентировать температуры нагрева зоны соединения. Таким способом в промышленных масштабах сваривается 12X18H10T + АМгб; армко-железо + АМг5 и другие сочетания.

Биметалл, полученный сваркой взрывом и прокаткой, обладает высокой статической и

усталостной прочностью и находит широкое применение при изготовлении различных сталеалюминиевых конструкций в качестве проставок.

При выполнении монтажных соединений алюминиевые элементы соединяют аргонодуговой сваркой, а стальные – дуговой в среде углекислого газа. Режимы сварки и размеры проставок выбирают таким образом, чтобы в месте контакта алюминий – сталь не допустить появления интерметаллидов. С этой же целью сначала соединяют алюминиевые элементы, обеспечивая тем самым лучшие условия для стока теплоты.

При сварке плавлением и пайко-сварке процессы зарождения и роста интерметаллидной прослойки идут значительно интенсивнее. При формировании соединения существенным является смачивание твердой стали алюминием. Для улучшения смачивания и, значит, сокращения времени контакта расплава со сталью прибегают к легированию шва и нанесению покрытий на поверхность стальной заготовки (цинковое, цинко-никелевое – как наиболее технологичное и недорогое). После смачивания идет процесс растворения железа в жидком алюминии. Установлено, что образующаяся при растворении фаза  $Fe_2Al_5$  может переходить в расплав в виде кристаллов и растворяться. При этом скорость роста промежуточного слоя больше скорости растворения, что делает невозможным получение соединения без интерметаллидных прослоек. Снизить отрицательное действие этого фактора можно увеличением объема расплава алюминия (предварительная разделка кромки), оптимизацией режима с целью ограничения температуры расплава, легированием ванны через присадочный материал элементами, влияющими на скорость роста и состав интерметаллидной прослойки. Введение в шов 4...5 % Si, 6,5...7 % Zn, 3...3,5 % Ni позволяет уменьшить толщину интерметаллидного слоя и получить соединение с прочностью на уровне 300...320 МПа.

При сварке магниесодержащих алюминиевых сплавов вследствие высокой диффузационной подвижности магния и малой его растворимости в железе высококачественное соединение может быть получено только через прослойку чистого алюминия. Высокая окисляемость магниесодержащих сплавов и их более высокая вязкость являются дополнительными осложняющими факторами.

С учетом отмеченных особенностей в практике нашли применение два варианта технологии соединения плавлением алюминия со сталью: сварко-пайка с предварительным нанесением на стальную кромку покрытия с использованием аргонодуговых аппаратов с неплавящимся электродом; автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом по слою флюса АН-А1. Покрытия (цинковые, алюминиевые) имеют толщину 30...40 мкм и наносятся гальваническим способом или алетированием. При сварке необходимо вести дугу по кромке алюминиевого листа на расстоянии 1...2 мм от линии стыка и соблюдать определенную скорость (при малых скоростях наблюдаются перегрев и выгорание покрытий, при больших – несплавления).

При сварке под флюсом роль флюса сводится к улучшению смачивания и торможению образования интерметаллидов. Необходимо не допускать прямого воздействия дуги на кромку стали, а разделку кромки на стали делать надо возможно ближе к очертанию профиля ванны. Таким способом сваривают толщины 15...30 мм.

### 13.3. СВАРКА МЕДИ СО СТАЛЬЮ

При нормальной температуре сплавы железа с медью представляют собой твердые растворы железа в меди ( $\epsilon$ -фаза,  $\leq 0,2\% Fe$ ), меди в  $\alpha$ -железе ( $< 0,3\% Cu$ ) и смеси этих растворов ( $\alpha + \epsilon$ ). Растворимость меди в  $\alpha$ -железе меньше, чем в  $\gamma$ -железе. При 20 °C при равновесных условиях в  $\alpha$ -железе растворяется  $< 0,3\% Cu$ . При 850 °C максимальная растворимость меди в  $\delta$ -,  $\gamma$ - и  $\alpha$ -железе соответственно 6,5; 8 и 1,4 %. Растворимость железа в меди уменьшается с понижением температуры с 4 % при 1094 °C до 0,4 % при 750 °C, при 650 °C падает до 0,2 %, а с дальнейшим снижением температуры изменяется незначительно.

Введение углерода в железомедные сплавы несколько снижает растворимость меди. Марганец и кремний улучшают растворимость. Марганец расширяет область  $\gamma$ -твердого раствора, в котором медь растворяется интенсивнее.

Физико-химические свойства меди и железа близки (строение кристаллической решетки, атомные радиусы и т.д.), что дает возможность получения непосредственного соединения меди (медных сплавов) с железом (сталью). Осложняющими факторами являются: разли-

чие в температурах плавления, сильная разница в теплопроводности и теплоемкости, высокое сродство меди к кислороду, ее высокая жидкотекучесть, склонность к пористости, появление эвтектики  $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ , охрупчивающей металл.

Типичным дефектом, сопровождающим сварку стали с медью (медными сплавами), наплавку, пайку сталей медьсодержащими припоями, т.е. процессы, в которых имеет место контакт стали с жидкой медью, является межкристаллитное проникновение (МКП) меди в сталь. Дефект представляет собой трещины в виде «клиньев», заполненных медью, часто охватывающей группу зерен. Его глубина от сотых долей миллиметра до 40 мм, локализация — в районе действия напряжения растяжения, у концентраторов напряжений. Частота появления дефекта от единиц до десятков на 1 см<sup>2</sup>. Дефект существенно снижает механические свойства стали ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\delta$ ) и особенно пластические. Трудно или невозможно обнаружить его неразрушающими методами контроля. Избежать появления дефекта для многих марок сталей без применения специальных методов не удается. Механизм МКП объясняется на основе представлений об адсорбционном понижении прочности, межзеренной коррозии и диффузии под напряжением, расклинивающего действия жидкой меди.

Исследования показали общность условий образования МКП меди в сталь и ГТ в ней. Механизм образования МКП может быть представлен так. В результате диффузии меди по границам зерен стали образуются легкоплавкие твердожидкие медистые прослойки, ослабляющие межзеренное сцепление. Под действием в высокотемпературной области растягивающих напряжений и деформаций в стали идет разрушение по межкристаллитным прослойкам и образуется ГТ. Расправленная медь заполняет («заличивает») под действием капиллярных сил и атмосферного давления образовавшуюся ГТ. Заполненные медью ГТ представляют собой МКП меди, которому способствуют увеличение массовой доли углерода в стали и повышенное содержание серы.

Все пути и приемы, направленные на предотвращение ГТ в стали, способствуют и предотвращению МКП меди.

Сокращение времени контакта жидкой меди со сталью, ведение процесса давлением при возможно более низкой температуре, легирование металла шва элементами, повышающими стойкость ГТ, применение барьераных

подслоев и проставок, повышение содержания ферритной фазы стали предотвращают этот дефект.

Для исключения появления МКП медь и ее сплавы свариваются со сталью различными методами в твердом, твердожидком и жидком состояниях. Из методов сварки давлением наибольшее распространение получила сварка взрывом, прокаткой, трением, диффузионная и контактная.

**Сварка трением** дает сварные соединения с прочностью на уровне основного материала в отожженном состоянии. Нет МКП меди в стали, что связано со спецификой процесса: максимальные температуры развиваются на соединяемых поверхностях и обычно составляют 700...800 °C (ниже температуры плавления более легкоплавкого металла).

**Сварка взрывом** дает высокопрочное соединение. Появление пор и микротрещин в зоне сварки крайне редко. Поверхность контакта чаще всего носит типичный для сварки взрывом волнобразный характер. Вблизи границы имеет место наклеп, а на стороне стали возможно появление в узкой зоне закалочных структур вследствие высокой скорости охлаждения. Толщина плакирующего слоя (médный сплав) обычно 4...10 мм. Отжиг при температуре 700...900 °C сваренных биметаллических листов повышает пластические свойства, несколько снижает предел прочности и уменьшает анизотropию свойств по площади листа. Метод применяется для получения слоистых листов и лент.

**Сварка прокаткой** используется для изготавления биметаллических листов и лент сталь + медь, сталь + латунь, сталь + монельметалл и других сочетаний. В большинстве случаев соединение равнопрочно основному металлу. В результате термической обработки (нормализация при 750 °C в течение 30 мин) биметалла сталь — медь в углеродистой стали скапливается углерод непосредственно у медного слоя, а вблизи последнего находится зона, обедненная углеродом.

**Диффузионная сварка** позволяет получать сварные соединения медных сплавов со сталью на большой номенклатуре пар (бронза БрОЦ5-5-5 + сталь 20ХНР; бронза БрОЦ10-10 + сталь 10; бронза БрОЦ8-12 + сталь 12ХН3А; бронза БрХ0,8 + сталь Э; латунь Л59 + сталь; коснтантан + 12Х18Н10Т; бронза БрАЖМЦ10-3-1,5 + сталь 30ХГСА, медь М1 + армко-железо и т.д.).

Температура сварки зависит от состава медного сплава и лежит в диапазоне 700...1000 °С. Сварка меди МБ, М0Б, М1 с армко-железом ведется при 1000 °С. Этот температурный режим при соединении бронзы БрОСЧ10-2-3 со сталью 40Х вследствие наличия в сплаве свинца приведет к оплавлению поверхности уже при температуре 760...780 °С. В таких случаях целесообразна предварительная наварка на сталь медной прокладки малой толщины (порядка 1 мм) при температуре 900 °С, а затем сваркой получают заготовки с бронзой БрОСЧ10-2-3 при 750 °С. Сварка стали с медной прокладкой при предварительном нанесении на медь слоя никеля (200 мкм) повышает качество соединения и позволяет выполнять закалку стали. К применению прислоки никеля прибегают тогда, когда необходимо повысить прочность соединения. Никель образует непрерывный ряд твердых растворов с железом и медью, увеличивает растворимость железа в меди и меди в железе. Время сварки обычно лежит в диапазоне 7...30 мин, давление 1...20 МПа. Полученные изделия отличаются высокой размерной точностью, отсутствием дефектов.

**Контактная сварка** ведется с применением подкладок под электрод, обеспечивающих интенсификацию тепловыделения в зоне сварки и высокие градиенты температур (например, листовой молибден толщиной 0,6 мм со стороны медного сплава при сварке стали 10 с латунью Л63).

Возможна ультразвуковая сварка деталей малых толщин. Колебания подводятся со стороны меди.

При сварке плавлением используют различные методы – ручную электродуговую сварку плавящимся и неплавящимся электродом, механизированную и автоматическую сварку под флюсом и аргоне, электронно-лучевую, газопламенную и др.

Получить высококачественные соединения помогают различные приемы: преимущественное плавление медного сплава (смещение пятна нагрева на медь), концентрированный источник теплоты, наплавки и проставки из материалов, не склонных к образованию трещин, и т.п.

Ручную электродуговую сварку ведут на максимальных скоростях на короткой дуге, без колебаний. Предварительно заготовки тщательно зачищают и обезжиривают. Обезжиривают и присадочную проволоку.

Аргонодуговую сварку неплавящимся электродом выполняют на постоянном токе прямой полярности, электрод – вольфрамовый. Используют ее при толщинах ≥1 мм.

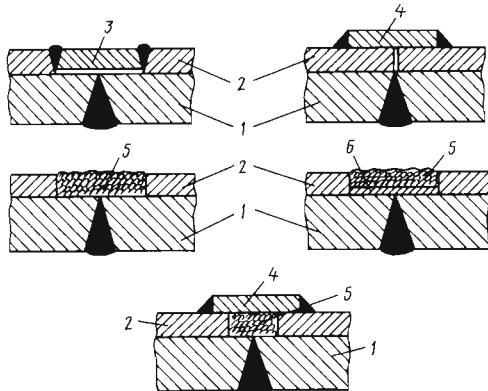
Медь со сталью больших толщин можно сваривать вручную угольными или металлическими электродами. При толщинах 3 мм применяют автоматическую сварку под слоем флюса (ОСЦ-45). Режимы подбирают, исходя из необходимости сквозного проплавления меди. Смещение электрода от плоскости стыка на 1/2 толщины заготовки. Стальная заготовка может иметь разделку. Зазор не должен превышать 1...1,5 мм. Сварку под флюсом ведут на флюсовой подушке с применением графитовых и остающихся стальных подкладок. Для предотвращения вытекания жидкой меди используют формирующее устройство из графита.

При сварке austenитных сталей с медью и медными сплавами во избежание МКП меди на стальную заготовку наплавляют подслой из austenитно-ферритного металла или применяют промежуточную вставку из austenитно-ферритной стали (типа 1Х21Н5Т), которая благодаря большому содержанию  $\alpha$ -фазы (до 60...70 %) проявляет стойкость против образования трещин. При содержании в стали >30 %  $\alpha$ -фазы предотвращается МКП меди. Хорошие результаты дает применение вставок из сплавов на никелевой основе (типа ХН67МВТЮР), так как никель имеет неограниченную растворимость в меди.

При использовании электронно-лучевой сварки удается получить шов малой ширины на больших скоростях. Луч направляется по стыку или с некоторым смещением в сторону меди (порядка 0,5 мм). В процессе сварки может наблюдаться смещение луча на сталь.

При сварке меди с низколегированной сталью неплохо показала себя добавка в металл шва небольших количеств алюминия (в стыке размещают алюминиевую фольгу из расчета 0,01 г алюминия на 1 мм шва).

При изготовлении изделий из листового биметалла, получаемого сваркой взрывом и прокаткой, соединения выполняются послойно. Если глубина ванны превосходит толщину свариваемого слоя, возможен переход меди в стальной шов и стали – в медный. В местах расплава контакта меди со сталью может иметь место МКП меди. Все это ухудшает механические свойства и коррозионную стойкость биметалла. Для предотвращения этих нежелательных явлений прибегают к использованию специальной конструкции сварного соединения (рис. 13.12).



**Рис. 13.12. Варианты конструктивного оформления соединения при сварке биметалла медь – сталь:**

1 и 2 – стальной и медный слои соответственно;  
3 – проставка; 4 – накладка; 5 – наплавка;  
6 – подслой

При сварке биметалла и его использовании в качестве проставки в результате нагрева в зоне перехода сталь – медь может снижаться прочность. Термическая обработка такого материала показала, что кратковременный нагрев до 5 мин вплоть до 950 °С и длительный до температуры 250 °С не оказывает существенного влияния на механические свойства биметалла. Это необходимо учитывать при выборе размеров проставки.

#### 13.4. СВАРКА СТАЛЕЙ С ТИТАНОВЫМИ СПЛАВАМИ

Титан с железом образуют систему ограниченной растворимости и эвтектоидным распадом  $\beta$ -фазы. Предел растворимости титана в железе снижается от 12 % при 1200 °С до 4 % при 300 °С. Растворимость железа в  $\alpha$ -титане составляет 0,5 и 0,05...0,1 % соответственно при 615 и 20 °С. Титан и железо дают химические соединения  $TiFe$ ,  $TiFe_2$ ,  $Ti_2Fe$  и эвтектику  $\beta$ -фаза +  $TiFe$  (1100 °С),  $TiFe$  +  $TiFe_2$  (1280 °С),  $TiFe_2$  +  $\alpha$ -фаза (1298 °С), содержащие 32; 62,5 и 82,5 % железа соответственно. Поэтому при затвердевании расплава уже при содержании железа порядка 0,1 % будут образовываться интерметаллиды  $TiFe$  и  $TiFe_2$ , которые резко снижают пластические свойства материала.

Титан и железо существенно различаются по кристаллическому строению и физическим свойствам.

Аналогичную картину металлургического взаимодействия титан имеет с легирующими компонентами в сталях (никель и др.).

Положительные результаты могут быть получены при использовании методов сварки давлением, а также барьерах слоев и вставок из третьего металла, не образующего при высоких температурах со свариваемыми материалами хрупких фаз. Особенностью титана и титановых сплавов является их высокая активность с атмосферным газом, что требует ведения процесса в условиях, обеспечивающих их защиту (инертные газы, вакуум, жидкие среды).

**Сварка взрывом** осуществляется с промежуточными прокладками и без прокладок. В последнем случае могут появиться интерметаллиды  $TiFe$  и  $TiFe_2$  в местах вкрапления литього металла и перемешивания. При отжиге таких соединений идет дальнейший рост интерметаллидной фазы, выделяются карбиды титана. В зоне контакта может наблюдаться появление пор. В качестве прокладок используют ниобий, ванадий, никель, медь, серебро, железо и сплавы из тугоплавких металлов.

Получила применение двойная прокладка из ванадия или ниobia со стороны титана и медная со стороны стали. Нагрев соединений, полученных с использованием барьера подслоев, до 800 °С не ведет к охрупчиванию шва. Некоторое снижение предела прочности при этом связано со снятием эффекта наклепа. Уменьшение толщины медной прослойки до 0,1 мм повышает предел прочности соединения, что объясняется проявлением эффекта контактного упрочнения. Разрушение соединений при испытаниях идет по слою меди и имеет вязкий характер при положительных и отрицательных температурах (+300...–269 °С).

При диффузионной сварке удовлетворительные механические характеристики получаются, когда ширина слоя интерметаллидов  $\leq 3\ldots 5$  мкм, а в ЗТВ имеет место  $\alpha$ -твердый раствор железа в титане. При испытаниях зона разрушения наблюдается в переходе титан – железо (сталь). На прочность соединения влияет ширина зоны, обогащенной углеродом.

Механические характеристики стыковых соединений, выполненных диффузионной сваркой в вакууме на материалах BT1-0 + + 12X18H9T и OT4 + 12X18H9T (температура 750...850 °С, время сварки 15 мин), оказываются ниже прочности основного материала. Применение прокладок из ванадия и меди при

сварке ВТ6, ВТ5-1 со сталью 12Х18Н9Т позволило получить предел прочности вплоть до 530...570 МПа. В соединении не обнаруживается интерметаллидных фаз даже после длительного нагрева при высокой температуре (1000 °C в течение 10 ч). Слой меди при сварке предотвращает образование карбидов ванадия, охрупчивающих соединения. В соединении ванадий – медь легкоплавкие соединения и интерметаллиды не образуются. Соединения, выполненные через комбинированные прокладки меди (толщина 0,01 мм) и ванадия (0,07 мм), дают предел прочности 489...503 МПа при 450 °C, удельную вязкость 350 кДж/м<sup>2</sup>, угол загиба 50...60°.

Для получения стабильных результатов целесообразно в качестве прокладочного материала использовать тонкую многослойную ленту (V + Cu + Ni), полученную горячей прокаткой в вакууме. Благодаря такой ленте предел прочности соединений ВТ5-1 и АТ3 со сталью 12Х18Н10Т при растяжении составляет 500...590 МПа.

При сварке титана с низкоуглеродистыми сталями хорошие результаты дают прослойки из серебра.

Положительные результаты получаются при диффузионной сварке в расплаве солей (70 % BaCl<sub>2</sub> + 30 % NaCl). При этом обеспечиваются быстрый к равномерный нагрев, хорошая защита металла в процессе сварки и охлаждения.

**Сварка прокаткой** осуществляется в вакууме. Выявлено отрицательное влияние углерода на механические характеристики соединения из-за образования карбида титана (TiC). Увеличение содержания углерода в стали с 0,02 до 0,45 % ведет к снижению уровня прочности с 260 до 140 МПа. При использовании прокладок из ванадия содержание углерода в нем должно быть <0,02 %. В случае применения прокладок металлографическими и микрорентгеноспектральными методами обнаружить образование в биметалле на границе сваренных заготовок хрупких фаз не удалось.

При сварке ВТ6 со сталью 12Х18Н10Т с комбинированной прокладкой из Nb + Cu (вакуум 0,00266 Па, температура 350 °C, степень обжатия 45...50 %) получаются равнопрочные соединения (разрушение образцов при испытаниях – по меди). На границе ниобия с титаном образуются зоны твердых растворов, имеющие повышенную твердость.

На границе ниобия и меди имеет место диффузионная зона протяженностью порядка 40 мкм. В переходе ниобий – титан зона диффузии не наблюдается. Толщины прокладок ниобия берутся порядка 0,05...0,2 мм, меди 0,1...0,46 мм.

**Контактная и ультразвуковая сварка** листовых заготовок проводится с применением промежуточных прокладок.

При контактной сварке не допускается подплавления поверхности титана и стали. Наилучшие результаты контактная сварка дает через прослойку ниобия, а ультразвуковая – через слой серебра.

Получены положительные результаты по **клинопрессовой сварке** в аргоне титановых сплавов со сталью 12Х18Н9Т через прокладку алюминия или медь. Нагрев при использовании алюминия 350 °C, меди – 850 °C. Толщина прослойки 0,1...0,2 мм.

Из способов **сварки плавлением** наибольшее распространение получили электронно-лучевая и аргонодуговая сварка титана со сталью с применением вставок из ванадия и его сплавов. Для получения более высокой прочности целесообразно применять ванадий, легированный вольфрамом и хромом (5...10 %).

Предложен способ сварки титана со сталью в гелии с использованием интенсивно охлаждаемой прокладки. Возможна дуговая сварка в аргоне с применением в качестве присадочного материала медно-серебряного сплава (28 и 72 % соответственно), расплавляемой прокладки из монель-металла.

При сварке плавлением через ванадиевую вставку необходимо учитывать особенности сварки ванадия с титаном и сталью.

### 13.5. СВАРКА МЕДИ С АЛЮМИНИЕМ

Диаграмма состояния алюминий – медь свидетельствует, что в этой системе существует ряд устойчивых при комнатной температуре химических соединений:  $\Theta$ -фаза ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ),  $\eta$ -фаза ( $\text{AlCu}$ ),  $\xi_2$ -фаза,  $\delta$ -фаза ( $\text{Al}_2\text{Cu}_3$ ),  $\gamma_2$ -фаза ( $\text{AlCu}_2$ ),  $\gamma$ -фаза ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). Они характеризуются высокой твердостью и низкой пластичностью. При комнатной температуре медь обладает сравнительно малой растворимостью в алюминии, несмотря на сходство в кристаллическом строении этих металлов.

В сравнении с сочетанием алюминия с другими металлами (например, никелем, железом) для взаимодействия алюминия с медью

характерны большие скорости роста прослоек интерметаллидов и малая продолжительность латентного периода. Температурная зависимость последнего имеет вид

$$\tau_n = 3,8 \cdot 10^{-8} \exp(130 / RT).$$

Кинетика роста промежуточных фаз описывается уравнением

$$y = 9,1 \cdot 10^5 \exp(100 / RT) - \\ - 3,46 \cdot 10^{-2} \exp(30 / RT).$$

Эта зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Наличие латентного периода позволяет получать высококачественное соединение непосредственно алюминия с медью, такими методами сварки давлением, которые используют относительно невысокие температуры при малой продолжительности воздействия. Отмеченные закономерности возникновения и роста интерметаллических прослоек ведут к тому, что для каждого способа существует достаточно узкий диапазон значений технологических параметров режимов сварки и температурно-временных условий эксплуатации биметаллического соединения. Работа биметалла Al + Cu допускается при температуре, не превышающей 400 °C, во избежание интенсивного роста диффузионного слоя и резкого ухудшения механических свойств. При нагреве выше указанной температуры в соединении алюминий + Л96 по мере ее роста и увеличения продолжительности выдержки образца идет образование δ-фазы, которая диффундирует в латунь, в результате чего появляются γ₂-фаза и α-твердый раствор. Насыщение δ-фазы с другой стороны алюминия ведет к образованию θ-фазы.

В связи с тем что существуют достаточно пластичные сплавы системы Al – Cu, содержащие до 7 % Cu, и бронзы с содержанием до 10 % Al перспективно такое ведение процесса сварки плавлением, когда содержание меди в сварном шве не будет превышать 6...8 %.

Хорошей растворимостью в рассматриваемых материалах обладают серебро, цинк, кремний. Их бинарные диаграммы состояния достаточно просты. При нормальной температуре алюминий с цинком и кремнием являются двухфазными, образуя эвтектику. В системе Al – Ag установлено существование α-, β-, γ-,

δ-фаз и соединения Ag<sub>3</sub>Al. Серебро хорошо растворимо как в алюминии, так и в меди. Содержание цинка в алюминии при 275 °C составляет 31,6 %, в меди – 38 % (454 °C). Растворимость кремния в алюминии 1,65 % (577 °C), в меди – 5,2 % (548 °C).

Склонность к образованию химических соединений – основной осложняющий фактор при сварке алюминия с медью. Особенности сочетания физических свойств меди и алюминия таковы, что в большинстве случаев не вызывают дополнительных осложнений. Так, разница в 1,5 раза коэффициентов термического расширения не приводит к опасности разрушения соединения, так как оба материала высокопластичны. При изменении температуры оба материала проявляют одинаковые тенденции к изменению механических свойств, при низких температурах сохраняют высокую пластичность. Коэффициент тепло- и температуропроводности меди с повышением температуры в диапазоне 0...600 °C несколько снижается, а для алюминия возрастает почти в 2 раза в диапазоне 150...600 °C. При 500 °C значение коэффициента теплопроводности выравнивается, а при дальнейшем росте температуры значение этого параметра для алюминия становится выше.

Оксиды меди менее химически стойки. Упругость паров диссоциации для Cu<sub>2</sub>O при 727 °C составляет 1,8 · 10<sup>-1</sup> Па, для CuO при 900 °C равна 1,18 · 10<sup>-3</sup> Па, для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 727 °C 1,5 · 10<sup>-15</sup> Па. Толщина оксидной пленки на меди в 1,5 – 2 раза больше, чем на алюминии. На воздухе при нагреве CuO стремится перейти в Cu<sub>2</sub>O.

Сварка алюминия с медью проводится различными методами сварки давлением и плавлением.

Сварка давлением осуществляется методами холодной сварки, прокаткой, трением, ультразвуком, диффузионной, магнитно-импульсной, взрывом.

**Холодная сварка** применяется главным образом для местного плакирования алюминиевых деталей медью (токоведущие элементы трансформаторов, шинопроводы, токоподводы к электролизерам) точечной сваркой, получения стыковых соединений проводов, шин и других элементов компактных сечений. Материал заготовок – технически чистая медь и алюминий.

Методом холодной прокатки получают биметаллические листы, полосы (карточная и

рулонная прокатка). Степень обжатия при сварке прокаткой 60...75 %.

В связи с необходимостью создания в зоне соединения направленного течения металла эта специфика процесса налагает определенные ограничения на соотношения толщин исходных заготовок. В связи с этим получить листовой материал при толщине  $>4$  мм и малой толщине плакирующего слоя затруднительно или невозможно. Для электротехнической промышленности получают слоистый материал с минимальной толщиной медного покрытия 0,1...0,8 мм.

При местном плакировании медью алюминиевых деталей точечной холодной сваркой глубина вдавливания пуансона в 2 – 3 раза превышает толщину плакирующей меди. Особых ограничений на толщину алюминиевых деталей в этом случае нет. Недостаток метода – наличие вмятин от инструмента на поверхности детали.

Принципиальных ограничений на размеры сечений при сварке встык, кроме возможностей самого оборудования, нет. Реально сваривают элементы с площадью сечения до 1000 мм<sup>2</sup>. Техника подготовки и сварки не отличается от общих технологических закономерностей холодной сварки.

При этом способе сварки образование интерметаллидов исключено, так как процесс идет без предварительного нагрева.

Более широкая номенклатура толщин и материалов заготовок для изготовления слоистых листов может быть получена горячей прокаткой. Заготовки при этом нагревают до 450 °C. Для защиты металла (меди) от окисления используют двухстадийный процесс: предварительное обжатие при первом проходе на 65...80 % от суммарного обжатия для уменьшения контакта с воздухом рабочей поверхности медной заготовки; прокатку нагретого пакета в вакууме, вакуумированных конвертах, аргоне.

Распространен способ горячей прокатки, когда нагреву подвергается только алюминиевая заготовка, а холодные плакирующие медные листы накладываются непосредственно перед операцией обжатия. Такой прием снижает степень окисления. Обжатие ведется двухстадийно: на первом проходе 40...45 %. Суммарное обжатие 75 %.

Горячей прокаткой получают плакированный алюминий при толщине медного слоя 1,5...2,5 мм. Для улучшения механических

свойств (повышения предела прочности  $>100$  МПа и угла загиба до 110...180°) многослойные листы подвергаются термической обработке при температуре 250...270 °C в течение 2...8 ч.

Положительные результаты дает использование барьераного слоя из austenитной стали (12Х18Н10Т), позволяющего избежать охрупчивание и сохранить прочность алюмомедного листа даже после нагрева до 500 °C.

При сварке трением и ультразвуковой номенклатура свариваемых алюминиевых и медных сплавов шире. Основная особенность, присущая этим методам, состоит в том, что в силу их специфики из зоны соединения непрерывно идет эвакуация нежелательных продуктов взаимодействия материалов (интерметаллидов). При сварке трением меди со сплавом АМц на шлифах наблюдается прерывистая узкая (1,5 мкм) зона интерметаллидов.

Сварка трением налагает ограничения на конфигурацию сечения заготовок.

Для получения высококачественного соединения необходимыми условиями являются перпендикулярность поверхности торца к оси заготовки и предварительное снятие наклева путем отжига, удаления окалины и обезжиривания трущихся поверхностей. Алюминиевую заготовку размещают в осадочной матрице, что позволяет компенсировать различия в пластических свойствах свариваемых материалов. Цикл давления – ступенчатый. Проковка дает дополнительные возможности разрушения и частичной эвакуации из плоскости стыка интерметаллидной прослойки. Для диаметров заготовок 20...30 мм давление при нагреве и осадке соответственно 30...40 и 110...200 МПа. Суммарная осадка 14...20 мм. Получаемое соединение при испытаниях разрушается по алюминию.

При ультразвуковой сварке соединение выполняется внахлестку точками или непрерывным швом. В силу специфики процесса толщина заготовки, со стороны которой подводятся колебания, ограничена величиной порядка 1,2...1,5 мм из-за гистерезисных потерь в толще материала.

**Диффузионная сварка** дает доброкачественные соединения при сварке меди с алюминием и некоторыми его сплавами при максимально возможном ограничении температуры нагрева, времени сварки и при использовании барьераных подслоев и покрытий. В качест-

ве материала таких слоев можно использовать цинк, серебро, никель.

При **сварке взрывом** из-за кратковременности взаимодействия материалов при высоких температурах интерметаллиды не успевают образоваться или их количество незначительно. Шов обладает высокими механическими свойствами. Прочность соединения при этом выше прочности основного материала в результате наклена и большей протяженности поверхности сцепления из-за ее волнистости. Процесс позволяет получать нахлесточные соединенные в различных вариантах по практическим любой площади. Ограничения налагаются на максимальную толщину метаемой заготовки из-за опасности ее разрушения при образовании второго перегиба в процессе деформирования под воздействием продуктов разложения взрывчатых веществ (ВВ). Ограничения на минимальную толщину заготовки связаны с появлением нестабильности процесса детонации при чрезмерном уменьшении толщины слоя ВВ.

**Магнитно-импульсная сварка** имеет схожую со сваркой взрывом природу образования соединения, что позволяет получать доброкачественные соединения с минимальным количеством интерметаллической фазы. Наиболее просто свариваются телескопические соединенные. Толщина и диаметр заготовок ограничены возможностями оборудования (главным образом емкостью конденсаторных батарей, долговечностью индуктора). Реально сваривают трубные заготовки диаметром до 40 мм при толщине стенки порядка 1,0...0,2 мм.

**Сварка плавлением** может осуществляться только в том случае, когда обеспечивается в основном плавление алюминия. Это может позволить получать в шве металл с ограниченным (6...8 %) содержанием меди, что обеспечивает оптимальное сочетание свойств соединений. Основные пути решения задачи: применение рюмообразной разделки кромок, снижение опасности перегрева металла в корне шва, легирование металла шва рением, цинком, использование барьера подслоев.

Нанесение на медную кромку электролитическим путем слоя цинка толщиной порядка 60 мкм при аргонодуговой сварке позволяет снизить содержание меди в шве до 1 % и в 3—5 раз уменьшить протяженность интерметаллической прослойки со стороны меди (до

10...15 мкм). Кромка медной заготовки при этом разделяется под углом 60°. Введение цинка через присадку при аргонодуговой сварке под флюсом приводит к тому, что содержание меди ≤12 %, а количество цинка в шве может достигать 30 %. Соединения, получаемые в таких случаях, разрушаются при испытании по алюминию вдали от шва.

Электролитическое нанесение на медную кромку слоя олова или цинка при сварке металла малой толщины (3...8 мм) позволяет получать хорошие соединения, так как слой покрытия, выполняющий роль барьера, кроме того создает перед движущейся волной жидкого металла прослойку, облегчающую смачивание поверхности расплавом алюминия.

Есть опыт создания более сложных покрытий: нанесение электролитическим путем на медную заготовку слоя никеля толщиной порядка 50 мкм и затем аллитирование в расплаве алюминия ( $T = 810\ldots820^\circ\text{C}$ , время 10...20 с). Возможно покрытие поверхности меди оловом или свинцово-оловянным припоеем методом лужения.

Легирование шва кремнием при аргонодуговой сварке проводят через присадочный металл (проволока типа АК5).

Применение более жестких режимов сварки, чем необходимо для сварки алюминия, способствует получению удовлетворительного качества соединения. С уменьшением скорости сварки увеличивается переход меди в шов, растет время пребывания зоны контакта материалов при температуре интенсивного роста интерметаллидов. Рекомендуется выбирать погонную энергию из соотношения:  $q / V = (18,8\ldots20,9) \delta$ , где  $\delta$  — толщина свариваемого материала.

Смещение электрода в сторону более теплопроводной меди должно составлять (0,5...0,6) δ.

### 13.6. СВАРКА МЕДИ С ТИТАНОМ

Титан и медь обладают разными физическими свойствами, резко отличаются типами кристаллических решеток и размерами атомных радиусов. Малая взаимная растворимость, образование хрупких интерметаллических соединений ( $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}_3$ ,  $\text{TiCu}_2$ ,  $\text{TiCu}_3$ ) и легкоплавкой эвтектики затрудняют сварку меди с титаном (табл. 13.8 и 13.9).

### 13.8. Взаимная растворимость меди и титана, % (ат.)

$T_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$	Медь в $\alpha$ -титане	Титан в меди
300	—	0,2
500	0,5	0,5
600	0,6	1,6
700	—	2,0
798	1,6	—
800	—	3,9
850	—	5,2
870	—	6,5

### 13.9. Интерметаллидные соединения в системе титан – медь

Соединение	Атомная доля меди, %	Температурная область существования, $^\circ\text{C}$ , не более	Микротвердость, МПа
$\text{Ti}_2\text{Cu}$	30...33	1015	4420
$\text{TiCu}$	48...52	984	5530
$\text{Ti}_2\text{Cu}_4$	57	918	5000
$\text{Ti}_2\text{Cu}_3$	60	865	5970
$\text{TiCu}_2$	—	878...850	2530
$\text{TiCu}_4$	78...80	870	5040

**Примечание.** Соединение  $\text{TiCu}_2$  при температуре  $<850$   $^\circ\text{C}$  распадается на две фазы:  $\text{Ti}_2\text{Cu}_3$ ,  $\text{TiCu}_4$ .

Характерная особенность взаимодействия титана с медью при высоких температурах – очень быстрый эвтектоидный распад. Поэтому растворы одного элемента в другом не удается зафиксировать в сплавах ни при каких скоростях охлаждения. Кроме того, наличие в системе легкоплавкой эвтектики, имеющей открытый максимум плавления, способствует образованию жидкой прослойки по линии контакта двух металлов уже при температуре 860  $^\circ\text{C}$ . Поэтому основная задача при сварке титана с медью состоит в том, чтобы избежать появления интерметаллидов. Для этого необходимо: либо устранить перемешивание металлов при сварке плавлением, либо вести процесс в твердом состоянии при температурах, ограничивающих диффузию одного металла в другой. В условиях сварки плавлением, когда материал обеих заготовок находится в жидком состоянии, в металле шва при кристаллизации будут неизбежно появляться интерметаллиды и легкоплавкие эвтектики. Последнее обстоятельст-

во сопряжено с опасностью возникновения трещин. Рассматриваемые материалы сильно отличаются по температурам плавления и другим теплофизическими характеристикам.

В связи с указанными металлургическими и физическими особенностями для этой пары материалов наиболее перспективна сварка давлением. Применение методов сварки в жидкой фазе возможно при условии плавления только медной заготовки (режим сварко-пайки) с ограничением продолжительности контакта расплава с твердым металлом или с использованием промежуточных вставок, играющих роль барьера.

**Сварка плавлением** ведется с расплавлением лишь меди. Использование жестких режимов способствует сокращению времени контакта расплава с твердым титаном.

**Электронно-лучевая сварка** на жестких режимах дает соединения с удовлетворительными механическими свойствами только на тонких листовых заготовках. При аргонодуговой сварке предварительное напыление плазменным методом медного покрытия толщиной 0,15...0,25 мм на титановую кромку, смещение электрода от оси стыка в сторону меди на 2,5...4,5 мм и разделка титановой заготовки под углом 45° несколько улучшают условия формирования шва, но не предотвращают полностью появления интерметаллидов. При последующем нагреве такого соединения до 400...500  $^\circ\text{C}$  резко снижаются прочность и пластичность.

Предложен способ сварки меди с титановыми  $\beta$ -сплавами, обладающими объемно-центрированной кристаллической решеткой и более высокой растворимостью меди. К числу  $\beta$ -стабилизирующих элементов, которые не образуют с медью интерметаллидных фаз, относятся молибден, ниобий, ванадий, tantal.

Опробованы  $\beta$ -сплавы двойных систем: титан – молибден, титан – ниобий, титан – tantal и сплав BT15 толщиной 1,5...2 мм. Выполняли АДС неплавящимся электродом. Дугу смешали от оси шва на медную кромку. Из табл. 13.10 видно, что только сварные соединения сплавов Ti – 30 % Nb и BT15 с медью равнопрочны ОМ – меди. Наиболее высоких механических свойств сварных соединений достигали в тех случаях, когда обеспечивалось минимальное расплавление титана. Более прочные соединения получены при сварке сплавов Ti – 30 % Nb и BT15 с бронзой БрХ0,8 ( $\sigma_b = 286$  МПа;  $\alpha = 106\ldots162^\circ$ ).

### 13.10. Режимы сварки и свойства соединений сплавов титана с медью

Соединяемые металлы	$b$ , мм	$I_{\text{св}}$ , А	$U_2$ , В	Марка и диаметр присадочной проволоки, мм	Смещение электрода на медь, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\alpha$ , °
BT15 + M1	3	250	10	БрХ0,8; 1,2	2,5	181...207	—
	5	400	12	БрХ0,8; 2,0	4,5	191...227	
Ti – 3 % Al – 37 % Nb + M1	2	260	10	MCр10; 1,2	3,0	161...245	90
						116...141	90*
	5	400	12	MCр10; 2,0	4,5	236...243	120
						223...226	91*

\* Значения  $\sigma_b$  и  $\alpha$  образцов, подвергнутых нагреву до 800 °С в течение 5 мин.

Подтверждена возможность получения хорошо сформированных швов при сварке титановых сплавов BT15 и Ti – 3 % Al – 37 % Nb с медью M1 толщиной 2; 3 и 5 мм, обладающих удовлетворительными механическими свойствами.

Для защиты от теплового воздействия сварочной дуги и предотвращения контакта с жидкой медью на титановую кромку методом плазменной металлизации наносили медное покрытие толщиной 0,15...0,25 мм. При сварке пластин толщиной 3 и 5 мм на титановой кромке выполняли одностороннюю разделку под углом 45°.

Радикальным решением при сварке плавлением является применение вставок из ниобия или tantalа.

В настоящее время разработано несколько способов сварки плавлением титана с медью, предусматривающих применение промежуточных металлов – вставок из tantalа или ниобия и ванадия, а также сплавов титана со стабильной  $\beta$ -структурой.

При электронно-лучевой сварке получают соединения с высокой пластичностью (угол загиба 180°). При АДС этот показатель составляет 120...160°. Ударная вязкость на уровне 700...800 кДж/мм<sup>2</sup>. Разрушение при испытании сварных соединений происходит по границе с медным сплавом.

Применяя промежуточное кольцо из ниobia, АДС соединяли обечайки из титана и хромистой бронзы. Прочность таких соединений ограничивается прочностью медного сплава и составляет 310...325 МПа. Отмечается, что при использовании ниobia в качестве промежуточного металла при сварке титана с медными

сплавами необходима тщательная защита зоны сварки от взаимодействия с газами. Сварные соединения ниobia с медным сплавом характеризуются высокой химической неоднородностью металла шва.

Одним из перспективных методов соединения титана с медью является использование переходных биметаллических элементов, полученных совместной прокаткой или сваркой взрывом. Способ сварки с применением промежуточного тугоплавкого металла имеет существенные недостатки: вставки усложняют конструкцию соединения, затрудняют процесс сборки и сварки и значительно удороажают изделия. Кроме того, следует учитывать коррозионную стойкость соединений из разнородных металлов, если сварная конструкция предназначается для работы в агрессивных средах.

Для получения высококачественного соединения разнородных металлов, склонных к образованию интерметаллидных фаз, необходимо:

- создать условия для физического контакта по всей площади соединяемых поверхностей в начальный период сварки, когда диффузионные процессы не успели развиться;
- замедлить взаимную диффузию металлов, ограничив максимальную температуру нагрева заготовок, и, тем самым, исключить появление интерметаллидов в зоне контакта;
- активизировать соединяемые поверхности в основном за счет пластической деформации металлов. Изменяя в широких пределах параметры режима диффузионной сварки и обеспечивая оптимальные условия формирования соединения, можно получить хорошее не-

посредственное соединение не только титана с медью, но и других металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью и резко отличающихся своими физико-химическими свойствами.

**Диффузионная сварка** без применения барьерных слоев возможна в узком диапазоне соединения с низкой прочностью.

Более высокие и стабильные прочностные показатели при соединении титана с медью достигаются при использовании барьерных слоев, препятствующих взаимодействию соединяемых металлов.

Для получения равнопрочного соединения используют прослойки из ванадия, молибдена, ниобия.

Оптимальный режим диффузионной сварки меди МО6 с титаном ВТ1 без применения промежуточной прослойки:  $T_{\text{св}} = 973$  К,  $p = 6$  МПа,  $t = 20$  мин. Прочность полученного соединения ниже прочности исходных материалов. Для получения равнопрочного соединения целесообразно использовать прослойку ванадия. Температура сварки в этом случае 993 К.

Диффузионную сварку титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 с медью М1 и бронзой БрХ0,8 проводят с применением прослоек из молибдена или ниobia толщиной 0,1...0,2 мм. Прослойку напыляют на титан, и образец перед сваркой отжигают в вакууме при 1673 К в течение 3 ч. В табл. 13.11 приведено сопротивление отрыву и режимы сварки титанового сплава с медью и бронзой через промежуточный материал.

Более высокие прочностные показатели связаны с тем, что молибден и ниобий образуют с титаном твердые растворы, а в контакте их с медью не возникает хрупких фаз. Ниобий с медью образует ограниченные растворы.

В молибдене при 1223 К растворяется 2,2 % Cu [1,5 мас. доли (%)].

Из табл. 13.11 видно, что во всех случаях прочностные свойства соединений, полученных диффузионной сваркой с печным нагревом, выше, чем при индукционном. Наименьшая прочность наблюдается при непосредственном соединении титана с медью.

Наиболее высокие прочностные показатели при ограниченной макропластической деформации меди достигаются при  $T_{\text{св}} = 1223$  К,  $p = 15$  МПа,  $t = 20$  мин.

Непосредственное соединение титана с медью осуществлено холодной сваркой сдвигом. Сущность этого способа заключается в том, что на свариваемых поверхностях предусматриваются выступы и соответствующие им впадины, а при соприкосновении свариваемые поверхности деталей должны находиться под углом к направлению сжимающего усилия. Таким способом были сварены пластины титана с медью размером 65 × 100 мм и цилиндрические детали диаметром 16 мм. Установлено, что оптимальная величина угла заточки выступов и впадин 7°. Прочность соединений получается почти в 2 раза больше, если выступы расположить на более мягкем металле и вдавливать их во впадины на твердом.

Необходимость применения в конструкции медных деталей, плакированных титаном, способствовала разработке технологии получения титаномедных полос и листов методом совместной прокатки. Такие медные листы, плакированные титаном, используются для изготовления токопроводов, работающих в агрессивных средах, а также для производства теплонапряженных частей химических аппаратов.

При изготовлении биметалла титан – медь совместной прокаткой рекомендуется применение ниобиевых прокладок толщиной

### 13.11. Режимы диффузионной сварки титана с медью и свойства соединений

Материал прослойки	$T_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$	$p, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$
Без прослойки	800 / 800	30 / 300	5,0 / 3,5	64 / 147...160
Молибден (напыленный)				80...115 / 190...220
Ниобий (напыленный)	950 / 980			72...105 / 190...220
Ниобий (фольга $b = 0,1$ мм)				93 / 220...272

**Примечание.** В числителе приведены режимы сварки и значения прочности соединений, полученных при использовании индукционного, а в знаменателе – печного нагрева.

0,1...1,5 мм. Отмечается необходимость тщательной защиты соединяемых поверхностей от окисления при нагреве и прокате, для чего процесс должен осуществляться в вакууме или герметизированной оболочке. Прочное сцепление листов происходит при относительной деформации 20...75 %. В случае непосредственной прокатки титана с медью рентгеноструктурным анализом в приграничной зоне обнаружены интерметаллиды типа  $TiCu_3$ ,  $TiCu$ ,  $Ti_3Cu$ .

Для получения соединений  $\alpha$ -сплавов титана с медью M1 стабильного качества целесообразна сварка взрывом с применением промежуточного слоя — ниобия. Толщина ниобиевой прослойки изменялась в пределах 0,3...1 мм в зависимости от толщины свариваемых титановых (5...15 мм) и медных (3...8 мм) листов. Предел прочности соединения в состоянии после сварки составлял 271...301 МПа, а после высокотемпературного нагрева (до 850...900 °C с выдержкой в течение 1 ч) — 196...204 МПа. При этом появления охрупчивающих прослоек не наблюдалось.

Сваркой взрывом получены высококачественные непосредственные соединения  $\beta$ -сплава Ti — 3 % Al — 37 % Nb с медью M1, работоспособные при нормальной температуре.

### 13.7. СВАРКА МЕДИ С ТУГОПЛАВКИМИ МЕТАЛЛАМИ (МОЛИБДЕНОМ, ВОЛЬФРАМОМ, ТАНТАЛОМ, НИОБИЕМ)

Медь с молибденом взаимно нерастворимы, но жидкую медь способна смачивать его поверхность. Поэтому для получения соединений этого сочетания материалов нашли применение сварко-пайка, диффузионная и электронно-лучевая сварка. В электронной промышленности распространен способ заливки в специальные оправки в вакууме молибденового стержня расплавом меди с последующим изготовлением из полученной заготовки деталей механической обработкой.

Одним из вариантов электронно-лучевой сварки меди M1 толщиной 1,5 мм с молибденом BM2 и tantalом толщиной 0,5 мм встык является случай, когда на молибденовые стержни диаметром 14 мм надевают медные втулки с толщиной стенки 1,5 мм и сварку проводят по кромке медной втулки внахлестку. В обоих случаях соединения вакуумно-плотные.

Сварные соединения вольфрама и меди, выполненные диффузионной сваркой непо-

средственно, имеют низкую прочность, не обладают высокой термической стойкостью при сохранении вакуумной плотности. Это связано со значительным различием коэффициентов линейного расширения этих металлов, что приводит к появлению напряжений при термоциклировании сварных соединений. Для релаксации напряжений и расширения зоны объемного взаимодействия диффузионная сварка меди и молибдена выполняется на тех же режимах через промежуточный слой никеля (5...7 мкм), наносимый гальванически на молибден. Никель обладает взаимной растворимостью с обоими свариваемыми металлами и позволяет получать сварные соединения с уровнем прочности до 133 МПа (температура сварки 700 °C, сварочное давление порядка 15 МПа, время сварки 15 мин). При этом значительно увеличивается усталостная прочность соединения в условиях термоциклирования.

Сварные соединения непосредственно меди с вольфрамом имеют невысокую прочность. Оптимальный режим сварки меди с вольфрамом через никелевую прослойку ( $T_{\text{св}} = 1223$  К,  $p = 16$  МПа,  $t = 25$  мин) обеспечивает прочность соединения.

Указанные выше режимы не гарантируют получения прочных медно-вольфрамовых и медно-молибденовых сборочных единиц, выдерживающих многочисленные (до 20 000) термоциклы. Для снижения внутренних напряжений, вызванных разностью коэффициентов линейного расширения соединяемых материалов, приводящих к появлению трещин в вольфраме и молибдене, диффузионную сварку проводят при температурах для вольфрама 1073 К, для молибдена 973 К при давлении 15 МПа в течение 15 мин. На свариваемые поверхности вольфрама и молибдена наносят никель толщиной 10...15 мкм. Прочность соединения при испытании на срез 100 МПа, соединения выдерживают 27 000 термоциклов без разрушения.

Тантал с медью растворов и соединений не образует, в качестве прокладки при сварке применяют термически обработанную бронзу БрБ2.

Ниобий удовлетворительно сваривают с медью и медными сплавами, с которыми он образует ограниченные растворы.

Сварка меди с ниобием осложнена значительным различием в температурах плавления и теплопроводности и различной реакцией на присутствие водорода. Поэтому для сварки

плавлением пригоден только ниобий с низким содержанием водорода. При 950 °C в никеле растворяется 2,2 % Cu [1,5 мас. доли (%)].

При аргонодуговой сварке вольфрамовый электрод располагают над медной кромкой при небольшом ее превышении над кромкой второй заготовки (порядка 0,2...0,25 мм), при электронно-лучевой луч смещают в сторону медной заготовки на ~0,75 ее диаметра. Процесс сварки критичен к точности сборки и расположению пятна нагрева на изделии. В случае отклонений от него появляются непровары, прожоги, подрезы. Из-за высокой теплопроводности расплав быстро кристаллизуется и в шве могут фиксироваться выделяющиеся пузырьки газа. Этот дефект устраняется при повторном переплаве.

При электронно-лучевой сварке бронзы БрХ0,7 с ниобиевым сплавом ВН2 для мелких деталей луч равномерно распределен на обе детали. При большей массе деталей луч должен быть смешен на 2/3 на ниобиевый сплав и на 1/3 на бронзу.

Сварные соединения, выполненные аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой, равнопрочны основному материалу (разрушение при испытании идет по меди) и достаточно пластичны (угол загиба 120...180°).

### 13.8. СВАРКА ТИТАНА С АЛЮМИНИЕМ

Металлы, значительно отличающиеся по рядковым номером от титана, очень разные по электронному строению и величине атомных радиусов, плохо свариваются с титаном. К ним относятся такие наиболее распространенные конструкционные металлы, как железо (VIII группа), алюминий (III группа) и медь (I группа). Между тем во многих отраслях техники оптимальные служебные свойства сварных изделий можно получить при изготовлении их в сочетании титана именно с этими металлами.

Титан и алюминий – металлы, имеющие весьма различные физико-химические и механические свойства. Характер их взаимодействия описывается диаграммой состояния, относящейся к системам с перитектическим превращением.

В системе титан – алюминий возможны три перитектические реакции. Первая протекает при температуре 1460 °C с образованием  $\gamma$ -фазы, представляющей собой химическое соединение типа TiAl с концентрацией алюминия 36,03 %, вторая – при температуре 1340 °C

(60...64 % Al) и сопровождается образованием соединения TiAl<sub>3</sub>. В результате третьей реакции из сплава, содержащего 0,15 % Ti, получается твердый раствор титана в алюминии. Предельная растворимость титана в алюминии имеет весьма малую величину: 0,26...0,28 % при температуре превращения, равной 665 °C. С понижением температуры растворимость уменьшается и достигает при 20 °C величины 0,07 %. Алюминий в титане дает ограниченные области  $\beta$ - и  $\alpha$ -растворов.

При сварке плавлением титана с алюминием при расплавлении титана невозможно избежать охрупчивания шва. Незначительная растворимость титана в алюминии и большая скорость образования химических соединений между металлами способствуют получению хрупких реактивных фаз в сварных швах. Сварные соединения с такими швами хрупки и непригодны к эксплуатации. Используя различие температур плавления титана и алюминия, сварку можно вести без расплавления титана при наличии жидкой ванны алюминия. При этом кратковременность взаимодействия жидкого алюминия с титаном и применение технологических мер могут существенно уменьшить количество хрупких фаз в сварном шве.

Разработка технологических процессов сварки, обеспечивающих удовлетворительные механические свойства сварных соединений, правильный выбор способа и параметров процесса требуют определения предельно допустимых температурно-временных условий взаимодействия свариваемых металлов.

На рис. 13.13 представлена зависимость периода задержки образования соединения TiAl<sub>3</sub> от температуры.

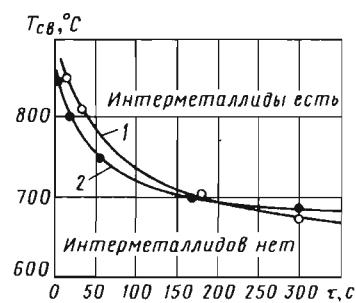


Рис. 13.13. Температурно-временные зависимости образования соединения TiAl<sub>3</sub> в контакте титана с жидким алюминием:

1 – экспериментальные данные;  
2 – расчетные данные

В связи с отмеченными особенностями получить соединение при расплавлении обеих заготовок с металлом шва, представляющим твердый раствор, практически невозможно. Шов всегда будет содержать интерметаллиды, сильно охрупчивающие соединение. Наличие периода задержки образования интерметаллида  $TiAl_3$  при сварке титана с алюминием позволяет сваркой плавлением получить удовлетворительное соединение. Однако технологический процесс и его энергетические параметры необходимо выбирать таким образом, чтобы перегрев алюминия в месте контакта с титаном не превышал  $800\ldots850^{\circ}\text{C}$ . Поэтому, применяя различные источники теплоты и технику сварки, до расплавления доводят только алюминий, смачивающий титан и образующий с ним сварное соединение. Такой способ использован, например, для получения сварных нахлесточных соединений.

Разработана технология изготовления титан-алюминиевых электролизеров с применением метода сварки с преимущественным расплавлением алюминия. Аноды электролизеров изготавливаются из листов титана ВТ1-0 толщиной 2 мм и листов алюминия АД1 толщиной 8 мм.

Все алюминиевые детали перед сборкой подвергали травлению в растворе едкого натра ( $150\ldots180\text{ г/л}$ ) при температуре  $60\ldots80^{\circ}\text{C}$  в течение  $0,5\ldots2$  мин, затем их промывали проточной водой и осветляли 30%-ным раствором  $HNO_3$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  в течение  $0,5\ldots1,0$  мин. Детали из титана подвергали шабров-

ке или травлению в растворе, содержащем  $250\text{ мл/л HCl}$  и  $40\ldots50\text{ г/л NaF}$ .

Сварку стыковых, нахлесточных и тавровых соединений (рис. 13.14) проводили неплавящимся электродом в аргоне. Дугу перемещали преимущественно по поверхности алюминия, при этом величина смещения электрода оси стыка колебалась в пределах  $0\ldots4$  мм в зависимости от толщины титанового листа. В качестве присадочного материала использовали проволоку марки АК-5 диаметром 3 мм; расход аргона в горелку составлял  $\sim 10$  л/мин (табл. 13.12).

Одним из главных условий получения высококачественного соединения титана с алюминием является непрерывное ведение процесса с максимально возможной скоростью, предупреждающей расплавление титана.

При испытании сварных соединений на разрыв разрушение происходит по линии сплавления или по алюминию с пределом прочности  $77\ldots84$  МПа, т.е. на уровне менее прочного основного металла (ОМ) – алюминия. Непосредственная сварка с расплавлением только алюминия не всегда дает стабильные результаты и во многих случаях ограниченно пригодна. Значительный интерес представляет способ соединения титана с алюминием с применением защитного слоя из алюминия, нанесенного перед сваркой на титановую кромку. Слой может быть нанесен наплавкой (рис. 13.15) или аллитированием титановых кромок в расплаве технического алюминия.

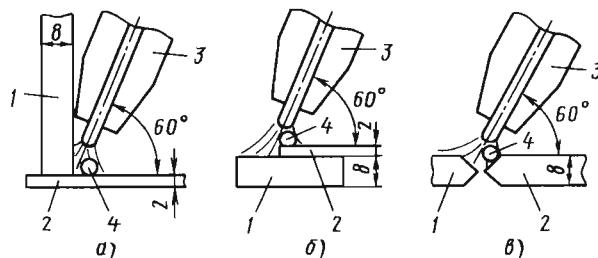
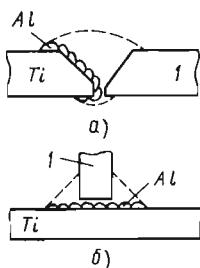


Рис. 13.14. Тавровое (а), нахлесточное (б), стыковое (в) соединения и схема процесса сварки:  
1 и 2 – алюминиевая и титановая пластины соответственно; 3 – сварочная горелка; 4 – присадочная проволока

### 13.12. Режимы сварки титан-алюминиевых соединений анодов электролизеров

Тип соединения	$b, \text{мм}$		$I_{cb}, \text{A}$	$Q_{Ar}, \text{л/мин, в поддув}$
	A1	Ti		
Тавровое	8	2	270...290	12
			190...200	15
Нахлесточное				
Стыковое	8...10	8...10	240...285	8



**Рис. 13.15. Схема сварки стыкового (а) и таврового (б) титан-алюминиевого соединения:**  
1 – алюминиевый сплав

Даются рекомендации по алитированию титана в расплаве алюминия под флюсом. При соблюдении оптимальных режимов удается получить слой алюминия, который прочно скреплен с титаном. Перед сваркой титана толщиной >8 мм с алюминиевыми сплавами АМгб, Д20 и АД1 на предварительно алитированную титановую кромку наплавляют слой технического алюминия. Режим наплавки:  $I_{\text{св}} = 170 \dots 180 \text{ A}$ ,  $U_d = 18 \dots 20 \text{ В}$ , диаметр присадочного материала 5...8 мм, расход аргона 16...18 л/мин. Затем наплавка подвергается механической обработке. После подготовки титановая кромка с наплавкой стыкуется с алюминиевой и сваривается присадочной проволокой состава, соответствующего марке свариваемого алюминиевого сплава. Режим сварки и число проходов выбирают исходя из толщины соединяемых элементов. Предел прочности таких соединений колеблется в пределах 110...270 МПа и зависит от толщины слоя наплавленного технического алюминия, оптимальная величина которого не должна превышать 1...1,5 мм. Сварные соединения имеют угол загиба 17...30°, а разрушение при растяжении происходит по алюминиевой прослойке

или по зоне шва, обедненной легирующими элементами.

Проводили работы по сварке тонколистового титана с алюминием с предварительным алитированием титановых кромок. Сваривали технический титан ВТ1-1, а также сплавы ОТ4 и ВТ5-1 с алюминием АД1 и сплавом АМгб толщиной 1; 1,5; 2; 3 и 6 мм. Алитирование выполняли в расплаве чистого алюминия, под слоем флюса АН-А1 при температуре ванны 720...780 °C и времени выдержки 25...40 с. Пластины сваривали аргонодуговой сваркой встык неплавящимся электродом с применением присадочной проволоки марки АД1 или АМгб в зависимости от химического состава свариваемых сплавов и со смещением дуги на алюминиевую кромку (табл. 13.13). Смещение электрода при сварке равнялось по величине толщине свариваемых пластин. Полученные по этой технологии сварные соединения удовлетворительно сформированы, проплавление кромок полное при хорошем формировании обратной стороны шва, которое обеспечивается специальной подкладкой. Установлено, что охрупчивающие интерметаллические прослойки по линии контакта двух металлов отсутствуют, расплавления титана и его перемешивания с алюминием не происходит.

**Сварка давлением** – весьма перспективный способ соединения разнородных металлов, в том числе титана, с другими металлами. Важной особенностью этого способа является то, что образование физического контакта, межатомное и объемное взаимодействия при формировании соединения происходят в твердой фазе. Физический контакт возникает в результате пластической деформации более мягкого из соединяемых металлов, а образование металлических связей завершается при определенной степени деформации приконтактных

### 13.13. Режимы сварки и механические свойства соединений титана с алюминием

Свариваемые металлы	$b$ , мм	$I_{\text{св}}$ , А	$U_d$ , В	Марка, диаметр присадки, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\alpha$ , °
ВТ1-1 + АД1	2	90...100	12...14	АД1; 2,5	82...93	180
ОТ4 + АМгб	3	120...130	14...16		169...240	90
ВТ5-1 + АМгб	2	90...100	12...14		166...231	80
	6	220...250	18...22	АМгб; 2,0	212...308	60
					238...318	45

объемов более твердого из соединяемых материалов. Диффузия в зоне контакта приводит к формированию ЗТВ, состоящей или из неограниченных твердых растворов, или из ограниченных твердых растворов с появлением эвтектоидов и интерметаллидов.

При сварке разнородных металлов давлением часто используют промежуточные прокладки. Они изготавляются, как правило, из металлов, свойства которых отличаются от свойств свариваемых металлов, и предназначаются для того, чтобы в зоне контакта:

- исключить образование интерметаллидов;
- снизить уровень остаточных напряжений;
- активировать поверхность твердого металла;
- интенсифицировать диффузионные процессы.

Изучение кинетики образования и роста интерметаллидной прослойки в соединениях титана с алюминием при повышенных температурах показало, что при температурах нагрева 450...500 °C в течение 5 ч по границе контакта титан – алюминий не наблюдается появления фазы TiAl<sub>3</sub>. Поэтому многие исследователи для соединения титана с алюминием и его сплавами использовали способы сварки давлением.

Установлена возможность получения прочных сварных соединений титана BT1 с алюминиевым сплавом AMg6 с применением холодной сварки. Эксперименты проводили на цилиндрических стыковых образцах как с подогревом, так и при нормальной температуре. Необходимый характер деформирования обеспечивали различной величиной вылета  $h_1$  и  $h_2$  свариваемых деталей (рис. 13.16). Чтобы деформировать объем металла, обеспечивающий удовлетворительное качество сварки, процесс осадки циклически повторяли. Результаты испытаний показали высокую прочность соединений ( $\sigma_b = 304...310$  МПа).

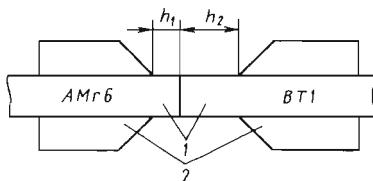


Рис. 13.16. Схема стыковой холодной сварки разнородных металлов:

1 – свариваемые детали; 2 – зажимные губки

Аналогичным по механизму образования соединения является способ получения титан-алюминиевых трубопроводов с помощью холодной сварки за счет совместного деформирования заготовок (рис. 13.17). Технологический процесс сварки заключается в том, что алюминиевую заготовку 1 совмещают с титановой 2, цилиндрическая поверхность которой имеет кольцевые канавки и выступы. По торцу оправки 3 прилагают осевую силу  $P$  и спрессовывают алюминиевую заготовку при перемещении обжимного кольца 4 в заданное положение. Канавки на титановой заготовке заполняются алюминием, создавая контакт между соединяемыми деталями. По описанной технологии были сварены титан-алюминиевые трубчатые переходники с внутренним диаметром 10...100 мм и толщиной стенки 1...4 мм.

Получить удовлетворительные свойства титан-алюминиевых соединений можно также с помощью клинопрессовой сварки. Сочетание высокой степени пластической деформации, температуры нагрева и времени процесса создает благоприятные условия для формирования надежного соединения. Схема процесса (рис. 13.18) и оптимальные величины основных параметров сварки позволяют интенсифицировать термический и механический факторы активации контактных поверхностей, ограничить развитие объемной диффузии. Установлено, что величина угла заточки впрессовываемой детали существенно влияет на один из главных активирующих факторов – пластическую деформацию контактных слоев соединяемых металлов. С увеличением угла заточки титановой детали прочность соединения уменьшается. Угол заточки, при котором обеспечивается прочность сварного соединения выше прочности алюминиевой части переходника ( $\leq 120^\circ$ ).

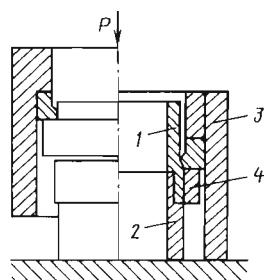


Рис. 13.17. Схема изготовления титан-алюминиевого переходника

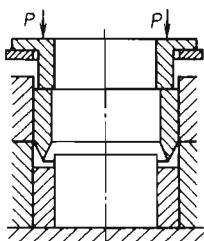


Рис. 13.18. Схема клинопрессовой сварки

Определены оптимальные параметры получения сваркой взрывом двухслойных соединений ВТ1 + АД1 с толщиной листов металла 8 + 1,5 мм соответственно и трехслойных ОТ4 + АД1 + АМг6 с толщиной листов 10 + 2 + 6 мм. Установлена зависимость качества формирования и свойств соединения от режимов сварки. При скоростях соударения свариваемых пластин в пределах 400...600 м/с прочность соединения 100...120 МПа, что соответствует прочности алюминия АД1 в упрочненном при взрывном нагружении состоянии. В случае скорости соударения >600 м/с по линии соударения происходит оплавление металлов и образуются локальные участки с твердостью 3700...4100 МПа.

Исследовали также влияние температуры нагрева от 100 до 600 °C с выдержками в течение 1 и 2 ч на прочность трехслойной композиции ОТ4 + АД1 + АМг6. На границе титана с алюминием после нагрева вплоть до 500 °C не обнаружено выделения интерметаллидных прослоек, что свидетельствует о значительной величине периода задержки образования фазы TiAl<sub>3</sub> в условиях эксперимента. Энергия активации процесса образования интерметаллидов, рассчитанная для сварки давлением, составляет 268 кДж/моль, в то время как для сварки титана с алюминием в жидкой фазе эта энергия имеет значение всего 163,4 кДж/моль.

Сопоставление этих данных свидетельствует о том, что диффузионные процессы протекают намного медленнее, если титан и алюминий соединяются в твердом состоянии.

Диффузионную сварку титана ВТ1-0 с алюминием АД1 осуществляли при температуре 520...540 °C в течение 60 мин. Полученные соединения имели предел прочности ≥90 МПа, а угол загиба составлял 180°.

Опыты по непосредственному соединению титана с алюминиево-магниевыми сплавами подтвердили необходимость применения промежуточного слоя из технического алюминия. Такие слои между свариваемыми заготовками выполнялись двумя способами:

- нанесением на титановую поверхность алюминия алитированием в жидкой ванне;
- применением алюминиевой фольги марки АД1 различной толщины.

Как при алитировании поверхности титана, так и в случае промежуточной прокладки из алюминиевой фольги получены сварные соединения, равнопрочные алюминиевому сплаву. Из табл. 13.14 видно, что с изменением толщины прослойки изменяется предел прочности соединения. На основании работ по оценке прочности сварных соединений с тонкими мягкими прослойками можно в зависимости от вида соединения и типа сплавов подобрать такую толщину прослойки из технического алюминия, которая обеспечит высокие механические свойства сварного соединения.

В ряде отраслей промышленности, в первую очередь в химическом машиностроении, для изготовления изделий применяется биметалл титан – алюминий. При сварке биметалла встречаются те же затруднения, что и при соединении титана с алюминием: образование интерметаллидов, охрупчивающих соединение. Обязательное условие получения соединения биметалла, обладающего удовлетворительными

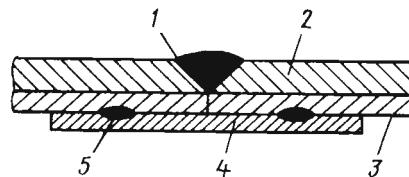
#### 13.14. Режимы сварки и предел прочности и соединений ВТ1-0 + АМг3

$T_{cb}$ , °C	$p$ , МПа	$t$ , мин	$\sigma_b$ , МПа	Место разрушения	Примечание
520...540	200	30	202...224	Алитированный слой, сплав АМг3	Алитирование: 780...820 °C, 35...70 с
		60	182...191	Прослойка АД1	Прослойка фольги АД1, $b = 0,4$ мм
			216...233	Прослойка АД1, сплав АМг3	То же, $b = 0,2$ мм

свойствами, – отсутствие хрупких фаз при контакте алюминия с титаном в ЗТВ. Сварка плавлением биметалла со стороны титана приводила к разрушению всего алюминиевого слоя, находящегося в пределах ЗТВ, и к возникновению интерметаллидных соединений по линии контакта металлов, а иногда и к растрескиванию шва на титане. Поскольку механическое удаление части алюминиевого слоя биметалла на тонком материале затруднено и не дает должных результатов, дуговую сварку титанового слоя биметалла хотя бы с частичным его расплавлением следует исключить.

Лучшие результаты дает точечная сварка титанового слоя, а для толщин  $\leq 1,0$  мм – конденсаторная, протяженность ЗТВ которой минимальна.

На рис. 13.19 представлена схемастыкового соединения биметалла, выполненного по описанной технологии. Вначале титановая сторона биметалла соединяется конденсаторной сваркой с помощью накладки из того же материала, что и основной слой. Толщина накладки выбирается из условия равнопрочности соединения ОМ. Затем осуществляется аргонодуговая сварка алюминиевого слоя. При этом титановый слой биметалла выполняет роль подложки, на которой формируется шов из алюминия. Сваривали тонколистовой биметалл, полученный совместной горячей прокаткой. Толщина слоя технического алюминия АД1 составляла 1,2...1,5 мм, а титана ВТ1-0 0,8...1,0 мм. Лучшее формирование шва и полное проплавление алюминиевого слоя обеспечиваются при  $I_{\text{св}} = 40...50$  А с использованием присадочной проволоки АД1 диаметром 2 мм. Поскольку при таком режиме сварки мощность дуги недостаточна, чтобы подплавить титан, то он не переходит в шов. Интерметаллидный слой по линии контакта в этом случае не обнаружен.



**Рис. 13.19. Схема стыкового соединения**

**биметалла титан – алюминий:**

1 – шов; 2 – алюминий; 3 – титан; 4 – накладка;  
5 – сварная точка

Предложенная технология сварки изделий из тонколистового биметалла титан ВТ1-0 – алюминий АД1 обеспечивает коэффициент конструктивной прочности, равный единице.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
2. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук и др. Киев: Наукова думка, 1986. 240 с.
3. Сварка в машиностроении. Т. 2 / Под ред. А.И. Акулова. М.: Машиностроение, 1978. 462 с.
4. Сварка и свариваемые материалы. Свариваемость материалов. Т. 1 / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
5. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курченко, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.

## Г л а в а 14

# ТЕХНОЛОГИЯ НАПЛАВКИ

---

---

### 14.1. НАЗНАЧЕНИЕ И СПОСОБЫ НАПЛАВКИ

Сущность наплавки состоит в нанесении сваркой либо другими способами на поверхность детали слоя, обладающего требуемым комплексом свойств. Непременными условиями наплавки являются получение хорошего сплавления, отсутствие или в отдельных случаях минимальное количество пор и трещин.

В зависимости от назначения детали наплавки подразделяют на «изготовительные» и «восстановительные». Первые применяются для получения на всей поверхности детали или ее части слоя из особого материала, имеющего необходимые свойства: износостойкость, термо- или коррозионную стойкость и т.п., вторые служат для восстановления первоначальных форм и размеров изношенных деталей с получением на наплавленной поверхности первоначальных свойств или даже лучших.

Способы наплавки, так же как и способы сварки, классифицируются по типу энергии, вкладываемой в изделие для получения надежного соединения наносимого слоя с материалом основной детали, на механические, термо-механические и термические. Наиболее распространены дуговые методы наплавки.

#### 14.1.1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПОКРЫТИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Этот вид наплавки применяется наиболее часто благодаря своей универсальности: детали могут быть практически любой формы, находиться в любом пространственном положении. Легирование наплавленного металла происходит через состав стержня электрода и его покрытие. Минимальная толщина наплавленного слоя 1,5...2 мм характеризуется значительным проплавлением основного металла, его существенным перемешиванием с электродным (до 50 %), невысокой производительностью: 0,8...2,5 кг/ч. Наплавленный металл по длине и ширине наплавки имеет нестрого постоянный химический состав, а следовательно, и свойства.

Однако простота применяемого оборудования (обычное сварочное), возможность получения наплавки практически любой системы легирования делают способ весьма распространенным.

#### 14.1.2. МЕХАНИЗИРОВАННАЯ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАПЛАВКА ПОД ФЛЮСОМ

Она выполняется сплошной проволокой, порошковыми проволоками и лентой, имеет большую производительность (до 5 кг/ч), лучшую равномерность по свойствам наплавленного металла по его сечению. Применение порошковых наплавочных материалов существенно повышает диапазон легирования. Особенno расширяется возможность легирования и уменьшается степень перемешивания основного и присадочного материалов благодаря применению специально изготовленной магнитолегирующей шихты.

Данные способы могут использоваться и при наплавке в защитных газах. В этом случае легирование достигается исключительно через присадочную электродную проволоку. При необходимости производить наплавку в три-четыре слоя верхние слои наплавленного металла практически полностью по химическому составу соответствуют составу электродной проволоки.

При применении неплавящего электрода и присадочной проволоки удается существенно снизить содержание основного металла даже в первом слое наплавки (до 20 %), хотя в этом случае производительность существенно снижается. В целом же способ характеризуется большой проплавляющей способностью и весьма значительными деформациями.

#### 14.1.3. ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА

Различают плазменную наплавку струей (изделие находится не под напряжением) и дугой (изделие включается в электрическую цепь источника питания сварочной дуги). При наплавке первым способом получают неболь-

шое проплавление основного металла и поверхностный наплавленный слой почти полностью соответствует по химическому составу присадочной проволоке.

При наплавке с использованием сварочной сжатой дуги между электродом и изделием проплавление основного металла существенно увеличивается. Возрастает и степень перемешивания основного и присадочного металлов.

Достоинствами первого способа являются малое проплавление основного металла, низкий уровень сварочных деформаций. Плазменная наплавка дугой обладает большой производительностью (до 6 кг/ч) и может обеспечить получение за один проход толщины слоя до 6 мм.

#### 14.1.4. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА

Такого рода наплавка проводится в вертикальном, горизонтальном или наклонном положении детали с принудительным или свободным формированием наплавленного металла.

Рекомендуется для наплавки больших поверхностей – прокатных валков, зубьев ковшей экскаваторов большой емкости, крупнодульных зубьев шестерен и звездочек, в производстве заготовок для последующей прокатки биметаллических листов и др.

Широкое применение электрошлаковая наплавка получила при облицовке поверхностей в нефтехимии и атомной промышленности.

Она характеризуется высокой производительностью (до 200 кг/ч), малой долей основного металла в наплавке (до 10 %), хорошим диапазоном (разнообразием) по толщине наплавки (2...60 мм).

Одним из достоинств электрошлаковой наплавки является возможность формировать в жидком состоянии сечение и форму наплавки. Однако большая погонная энергия вызывает сильный перегрев основного металла, рост зерна в ОШЗ, потерю пластических свойств в ЗТВ.

#### 14.1.5. ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА

Применение нашли три способа лазерной наплавки:

- с подачей присадочного порошка в зону лазерного луча с помощью достаточно сложного дозирующего устройства;
- с оплавлением предварительно нанесенного на поверхность присадочного материала в виде пасты;

– с оплавлением предварительно напыленных поверхностей.

Быстрое (до 2000 °С/с) охлаждение наплавленного металла способствует получению высокотвердых структур в наплавке и поверхности основного металла. Способ весьма эффективен, хотя и требует специального дорогостоящего оборудования и обученного персонала. Его используют для наплавки лопастей турбин, клапанов, распределительных валов и других деталей ответственного назначения. Он позволяет получать наплавленные поверхности толщиной до 0,1 мм. Производительность при хорошо организованном серийном производстве может достигать до 1 кг/ч при доле основного металла в наплавленном 5...7 % за счет возможности перераспределения тепловложения.

#### 14.1.6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА

Этот вид наплавки выполняют в вакуумных камерах. Достоинством такой наплавки является возможность отдельно распределять мощность луча, идущего на подогрев наплавляемой поверхности и наплавляемого металла.

Отсюда – возможность добиваться практически минимального перемешивания основного и наплавочного материалов и только в слоях наплавки, прилегающих к основному материалу (3...5 %). Так как наплавка проводится в вакууме, то выгорание из присадочного материала легирующих элементов исключается; в результате появляется возможность легировать наплавляемый металл в любых количествах и сочетаниях. Присадкой служит проволока сплошного сечения или порошковая. Производительность такой наплавки достаточна велика: до 2 кг/ч, толщина наплавки может быть в пределах 0,2...3 мм.

Недостатками являются сложность и дороговизна оборудования и необходимость квалифицированного персонала и малый КПД установки.

#### 14.1.7. ГАЗОВАЯ НАПЛАВКА

Такая наплавка – довольно распространенный способ, проводимый на стандартном оборудовании газопламенного поста. В качестве присадки используется проволока сплошного сечения или порошковая. Иногда наплавку выполняют вдуванием порошка в зону пламени. В зависимости от компонентов ее легирования пламя регулируется от восстановитель-

ного до окислительного. Это позволяет легко изменять нагрев основного металла и присадки, что может обеспечить в необходимых случаях почти полное отсутствие перемешивания основного и присадочного металлов. Наплавка может проводиться во всех пространственных положениях и на деталях практически любой толщины.

Процесс достаточно энергоемкий, приводит к значительному нагреву основной детали и ее деформациям. Производительность газовой наплавки до 3 кг/ч, толщина наплавленного слоя 0,3...3 мм.

#### 14.1.8. ИНДУКЦИОННАЯ НАПЛАВКА

Это наплавка, проводимая в индукторах. Она подразделяется на два вида в зависимости от состояния присадочного материала. В одном случае твердый присадочный материал помещают на наплавляемую поверхность и направляют в индуктор, где он расплавляется. В другом случае отдельно расплавленный присадочный материал заливают на наплавляемую поверхность, затем в индукторе изделие дополнительно нагревают до полного растекания наплавки.

Иногда в обоих случаях используют дополнительно флюсы, способствующие смачиванию. Одним из требований при индукционной наплавке является необходимость иметь материал подложки с более высокой температурой плавления, чем наплавляемый. КПД процесса невысок, существует опасность перегрева основного металла. Однако можно подобрать такой режим, при котором почти полностью исключается перемешивание основного и присадочного металлов. Производительность такой наплавки может достигать 15 кг/ч при толщине наплавляемого слоя 3...4 мм. Процесс становится эффективным в условиях серийного производства и чаще всего применяется в сельскохозяйственном машиностроении.

#### 14.1.9. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ НАПЛАВКА

Ее выполняют на несколько модернизированных машинах для контактной сварки путем приварки ленточного или проволочного наплавляемого металла. Толщина наплавки может быть значительной (до 3 мм), однако целесообразно осуществлять наплавку тонких лент в несколько слоев. В этом случае исключается перегрев, и свойства металла сохраняются.

В последнее десятилетие чаще применяют способ наплавки ленты к изделию с использованием промежуточного порошкообразного подслоя, например из порошков типа ПГ-СР. В этом случае происходит как бы наплавка-напайка. Степень перемешивания основного металла и наплавленного практически нулевая. Производительность может достигать 2...4 кг/ч. Толщина наплавки зависит от числа слоев. При однослоевой наплавке рекомендуется  $\leq 1\ldots 1,2$  мм в случае использования в качестве присадки ленты.

#### 14.1.10. ПЛАКИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

Этот способ применяется для получения больших поверхностей или в крупносерийном производстве. Процесс мало чем отличается от обычной сварки взрывом, используются те же оборудование, камеры, взрывчатые вещества. Полученная в результате сварки взрывом двух или трехслойная заготовка направляется в прокатные стани для получения плакированного листа нужной толщины. Способ характеризуется высокой производительностью, отсутствием перемешивания основного и наплавленного металлов, небольшими деформациями. Практически толщина наплавленного слоя неограничена. Однако сложность оборудования и ограниченность ассортимента наплавляемого металла являются существенным препятствием для широкого применения способа.

#### 14.1.11. НАПЛАВКА ТРЕНИЕМ

Она напоминает обычную сварку трением, проводимую при вращении одного прутка или заготовки относительно другой при непрерывном их поджатии друг к другу. Наплавляемый металл как бы намазывается на поверхность другого. При этом наплавленный слой в зависимости от режима процесса может иметь весьма малую толщину (0,2...0,5 мм).

### 14.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Для восстановления или упрочнения наплавленных поверхностей в зависимости от условий работы деталей используют самые разнообразные материалы как по структуре, так и по химическому составу. Именно этими характеристиками в основном определяют износостойкость и стойкость к воздействию рабочей среды наплавленных поверхностных слоев. Рассмотрим основные группы наплавленного металла.

#### 14.2.1. ПЕРЛИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Состав перлитных материалов (Нп-25, Нп-20ХГСА, Нп-90ХГСА и др.) обеспечивает в зависимости от скорости охлаждения наплавки перлитно-сорбитную структуру. Твердость наплавленного металла находится на уровне 25...40 HRC, износостойкость значительно уступает мартенситной структуре, поэтому сопротивление износу при трении невысоко. Наплавочные материалы этого класса часто применяют для создания «подслоя», на который наплавляют слой повышенной твердости.

#### 14.2.2. МАРТЕНСИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Данные материалы характеризуются образованием мартенситной структуры сразу после наплавки. Обладая повышенной твердостью, стойкостью при абразивном износе, наплавка этого типа характеризуется пониженными пластическими свойствами, хрупкостью, склонностью к образованию холодных трещин (ХТ). При работе в условиях ударного нагружения возможны отколы по основному металлу или в зоне сплавления.

Низколегированные мартенситные материалы (Нп-40Х3Г2МФ, Нп-40Х2Г2М, Нп-50Х6ФМС и др.), содержание легирующих элементов в которых относительно невысоко, обеспечивают в наплавке мартенситно-бейнитные структуры и отличаются сравнительно небольшой твердостью (45...50 HRC). Свойства наплавки повышаются в основном с увеличением содержания в ней углерода и хрома, что приводит к соответствующему возрастанию доли мартенситной составляющей.

Значительно большей твердостью характеризуются борсодержащие мартенситные наплавки (ЛС-У10Х7ГР1, ПЛУ-25Х25Г3Ф2РН, ПП-АН125, ПП-АН170), в структуре которых по границам высокоуглеродистого мартенсита расположены твердые карбиды и бориды. Материал отлично сопротивляется абразивному износу, задирам, но из-за повышенной хрупкости не может быть рекомендован для работы в условиях динамических нагрузок. Наплавка имеет повышенную склонность к образованию ГТ и ХТ, поэтому ведут ее, как правило, с подогревом и применением одного или нескольких подслоев. Отпуск в результате наложения нескольких слоев практически не снижает твердости.

Для обеспечения повышенной сопротивляемости к задирам применяют наплавочные

материалы, содержащие в своей структуре наряду с мартенситом значительное количество аустенитной фазы (Нп-50Х6ФМС, Нп-30Х5).

Мартенситные хромистые материалы типа Нп-30Х13 после наплавки имеют в основном мартенситную структуру с небольшим содержанием феррита. Износостойкость наплавки повышается с увеличением количества углерода. Низкоуглеродистые наплавки помимо достаточной износостойкости обладают повышенной жаростойкостью и антикоррозионными свойствами. С увеличением содержания углерода (Э-120Х12Г2СФ) в структуре появляется ледебуритная составляющая, что резко повышает износостойкость наплавки и делает ее пригодной для наплавки режущих кромок инструмента.

#### 14.2.3. ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТЫЕ АУСТЕНИТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы типа Нп-Г12А при резком охлаждении от температуры 1000 °C образуют аустенитную структуру с повышенными вязкостью и пластичностью. Длительная выдержка при температурах >400 °C приводит к выделению по границам зерен карбидов и вторичной перлитной фазы, снижающих пластичность. Уменьшение содержания углерода снижает вероятность образования вторичных фаз. В зоне сплавления основного низкоуглеродистого или низколегированного металла наплавки возможны образование хрупкой мартенситной прослойки и появление трещин. Для предотвращения их рекомендуют применение промежуточного слоя из хромисто-марганцовистой наплавки типа Нп-30Х10Г10Т.

#### 14.2.4. ВЫСОКОХРОМИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Высокохромистые материалы на основе железа типа Э-300Х28НЧСЧ, Э-320Х25С2ГР позволяют получать структуру, матрица которой состоит из аустенита с вкраплениями мелкодисперсных частиц карбидов бора и хрома, придающих наплавке высокую твердость. Поскольку твердость в основном определяется количеством карбидов, она практически не изменяется в процессе нагрева и не зависит от скорости охлаждения. Тем не менее, наплавку следует проводить при предварительном подогреве деталей до температур 400...500 °C, чтобы избежать появления ГТ, а также уменьшать скорость охлаждения.

Добавка ниобия, вольфрама, молибдена и других карбидообразователей способствует большему повышению твердости и появлению способности наплавки ко вторичному твердению; износостойкость при этом повышается.

#### 14.2.5. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Обычно наплавка проводится на изделиях из хромистых или хромоникелевых аустенитных сталей. Ферритная коррозионно-стойкая наплавка обеспечивается при высоком содержании хрома и весьма низком углерода. Наплавки этого типа в отношении к общей коррозии существенно уступают аустенитным, но превосходят последние по стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Технологические свойства аустенитной наплавки достаточно высоки. Однако при наплавке на стали мартенситного класса следует опасаться появления ХТ в зоне сплавления. Рекомендуется применять предварительный подогрев до относительно невысоких температур: 100...150 °C. Превышение этой температуры может привести к замедленному охлаждению наплавки и ее охрупчиванию.

### 14.1. Рекомендуемые области применения электродов

Условия работы	Типичные структуры наплавки	Марки электродов
Аbrasивный износ		13КН/ЛИВТ (60)*, Т-620 (60), ВСН-8 (60), Т-590 (62)
Аbrasивный износ при больших удельных давлениях и ударных нагрузках	Мартенсит, перлит	ОЗН-400У (42), Нп-70 (35), УЗ-40 (32), ОЗИ-3 (66), ОМГ-Н (30), ВСН-10 (42), ОЗШ-1 (38), 12АН/ЛИВТ (30), ТК3-Н (55)
Износ от трения по металлу при больших давлениях	Перлит, мартенсит, аустенит	ОЗН-250У (24), ОЗН-300У (32), ОЗН-350У (37), УОНИ-13/НЖ (40), ЦНИИН-4 (33), ВСН-6 (52), ВСН-9 (62), ЦН-16 (55), ЭНУ-2 (57)
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях и повышенных температурах. Термоусталость	Мартенсит, карбиды	ОЗШ-2 (56), ОЗШ-3 (55), УОНИ-13/4Х10В5МФ (45), ЭН-60М (55), ОЗШ-4 (58), ЦИ-1М (60), ОЗИ-4 (50), ОЗИ-5 (60)
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	Аустенит	ЦН-6Л (34), ВПИ-1 (25), ЦН-12М (45), ЦН-2 (45)
Износостойкие наплавки на металорежущий и быстро режущий инструмент	Мартенсит, карбиды	ИТ-10 (60), ЖСН-60Р (58), ОЗИ-5 (60)
Создание коррозионно-стойких поверхностей	Аустенит с 2...8 % феррита	УОНИ-13/Н1-БК (26), ЗИО-8 (25), ЭА-898/21Б (25), ЭА-855/51 (24), ЭА-582/23 (24), ЭА-400/10У (24)

\* В скобках дана величина твердости по Роквеллу или Виккерсу.

### 14.3. ВИДЫ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 14.3.1. ПОКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Электроды для ручной дуговой наплавки изготавливают по ГОСТ 10051-75. В качестве стержня обычно используют проволоку диаметром 3...5 мм, реже до 8 мм.

Этот стандарт устанавливает 44 типа наплавочных электродов (табл. 14.1). Значительное количество электродов для наплавки слоев с особыми свойствами производится по отраслевым техническим условиям. Твердость наплавленного металла проверяется по ГОСТ 9466-75 или 9013-59, а химический состав и остальные свойства – по ГОСТ 9466-75.

Твердость наплавки характеризуется индексами, указывающими ее величину по Виккерсу и Роквеллу, а цифры говорят о ее величине.

В табл. 14.2 приведен химический состав широко применяемых сварочных наплавочных электродов и даны отдельные примеры их применения.

## 14.2. Химический состав электродов металлических наплавочных (по ГОСТ 10051-75)

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V		
ОЗН-250У (Э-10Г2)	0,08...0,12	2,0...3,3						20...28 HRC	Оси, валы
ОЗН-350У (Э-12Г4)	0,09...0,18	3,6...4,5	≤0,15	—				35...40 HRC	Оси, валы, детали автосцепок
ОЗН-400М (Э-15Г5)		4,1...5,2						40...44 HRC	
ОЗШ-1 (Э-16Г2ХМ)	0,12...0,2	1,2...2,0	0,8...1,3	0,9...1,3	0,7...0,9			35...39 HRC	Молотовые, высадочные штампы
ЗН-60М (Э-70Х3СМТ)	0,5...0,9	0,4...1,0	0,8...1,2	2,3...3,2	0,3...0,7			52...58 HRC	Штампы, ножи
ОЗШ-3 (Э-37Х9С2)	0,25...0,5		1,4...2,8	8,0...11,0					
Л2АН/ЛИВТ (Э-95Х7Г5С)	0,8...1,1	4,0...5,0	1,2...1,8	6,0...8,0	—			25...32 HRC	Детали земснарядов, драг, экскаваторов
ЭН-Х12М (Э-100Х12М)	0,85...1,15	≤0,5	≤0,5	11,0...13,0	0,4...0,6			53...60 HRC	Штампы, ножи
ЦШ-1 (Э-30В8Х3)	0,3		≤0,3	2,0...3,5				7,0...9,0 W	40...50 HRC
ЦИ-2У (Э-90В10Х5Ф2)	0,9	≤0,4	≤0,4	4,0...5,0	—		2,0	10,0 W	57...62 HRC
ОЗИ-3 (Э-90Х4М4ВФ)	0,6...1,2	≤0,7	≤0,8	2,8...4,3	2,4...4,6	0,9...1,6	0,6...1,3 W	58...63 HRC	
ОЗИ-5 (Э-10К18В11М10Х3СФ)	0,8...0,12	0,3...0,7	0,8...1,6	1,8...3,2	7,8...11,2	0,4...0,8	8,8...12,2 W, 15,7...19,3 Co	28...63 HRC	Штампы, ножи
ОЗШ-6 (Э-10Х33Н11М3СГ)	≤0,13	0,8...2,0	0,8...2,3	30,0...34,0	9,0...13,0	2,0...3,2			53...61 HRC
ЦНИИН-4 (Э-65Х25Г13Н3)	0,5...0,8	11,0...14,0	≤0,8	22,0...28,5	2,0...3,5	—			250 HB
ЦН-6Л (Э-08Х17Н8С6Г)	0,05...0,12	1,0...2,0	4,8...6,4	15,0...18,4	7,0...9,0				28...37 HRC
ЦН-12М (Э-13Х16Н8М5С5Г4Б)	0,08...0,18	3,0...5,0	3,8...5,2	14,0...19,0	6,5...10,5	3,5...7,0		0,5...1,2 Nb	Детали запорной арматуры для энергетики и нефтехимии
T-590 (Э-320Х25С2ГР)				22,0...27,0				0,5...1,5 В	57...63 HRC
T-620 (Э-320Х23С2ГТР)	2,9...3,5	1,0...1,5	2,0...2,5	22,0...24,0	—	—		0,5...1,5 В, 0,5...1,5 Ti	57...63 HRC
ВСН-6 (Э-110Х14В13Ф2)	0,9...1,3	0,5...0,6	0,3...0,6	12,0...16,0			1,4...2,0	11,0...15,0 W	51...56 HRC

#### 14.3.2. ПРОВОЛОКА СТАЛЬНАЯ СВАРОЧНАЯ, ПРИМЕНЯЕМАЯ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Проволока для наплавки (ГОСТ 2246–70) и проволока стальная наплавочная (ГОСТ 10543–98) для автоматической наплавки под флюсом, в защитных газах, а также для газовой наплавки может изготавляться из стали, выплавленной электрошлаковым, вакуумно-дуговым или вакуумно-индукционным переплавами (табл. 14.3 – 14.5). Обычно для наплавки применяют проволоки диаметром 0,8...6 мм. С целью уменьшения оксидов в металле наплавки проволоки содержат увеличенное количество раскислителей: марганца, кремния, алюминия, титана.

#### 14.3. Рекомендуемые области применения сварочных проволок

Условия работы	Рекомендуемые наплавочные проволоки
Абразивный износ	Нп-40Х13 (50), Нп-Г13А (26), Нп-50 (24), Нп-40Х3Г2МФ (42), Нп-65 (33), Нп-80 (37), Нп-30ХГСА (33)
Абразивный износ с большими удельными давлениями и ударными нагрузками	Нп-40Х3Г2МФ (42), Нп-105Х (38), Нп-30Х10Г10Т (22), Нп-40Х2Г2М (56)
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях	Нп-30 (21), Нп-40 (22), Нп-50 (24), Нп-65 (33), Нп-80 (37), Нп-40Г (24), Нп-50Г (24), Св-08 (160 HB), Св-08ГС (190 HB), Нп-40Х2Г2М (56), Нп-Х13 (45), Нп-50ХФА (50), Св-18ХГС (24)
Износ от трения по металлу при больших давлениях. Термическая усталость	Нп-65Г (34), Нп-30ХГСА (33), Нп-30Х5 (40), Нп-5ХМА (45), Нп-50Х6ФМС (45), Нп-40Х13 (50), Нп-45Х4Б3Ф (42), Нп-60Х3В10Ф (48), Нп-45Х2В8Т (45)
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	Нп-Х15Н60 (180 HB), Нп-Х20Н80Т (180 HB)
Коррозионно-стойкие покрытия	Нп-20Х14 (36), Нп-Х15Н60 (180 HB), Св-20Х13 (45), Св-10Х17Т (35), Св-06Х19Н9Т (180 HB), Св-08Х19Н9ФС2 (23)

#### 14.4. Проволока стальная наплавочная сплошного сечения (по ГОСТ 10543-98)

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	прочих		
Нп-30	0,27...0,35						160...220 HB	
Нп-45	0,42...0,5	0,5...0,8		≤0,25			170...230 HB	Оси, валы, шпинделы
Нп-85	0,82...0,9		0,17...0,37		≤0,3		280...350 HB	Коленчатые валы, крестовины карданов
Нп-40Г	0,35...0,45	0,7...1,0					180...240 HB	
Нп-65Г	0,6...0,7	0,9...1,2		≤0,3			230...310 HB	Оси, валы, шпинделы
Нп-30ХГСА	0,27...0,35	0,8...1,1	0,0...1,2	0,8...1,1	≤0,4		220...300 HB	Обжимные прокатные валки, крановые колеса
Нп-50ХНМ	0,5...0,6	0,5...0,8	≤0,35	0,5...0,8	1,4...1,8	0,15...0,3 Mo	41,5...51,5 HRC	Штампы горячей штамповки
Нп-40Х3Г2МФ	0,35...0,45	1,3...1,8	0,4...0,7	3,3...3,8	≤0,4	0,1...0,2 V, 0,3...0,5 Mo	39,5...44,5 HRC	Ролики рольгангов
Нп-50Х6ФМС	0,45...0,55	0,3...0,6	0,8...1,2	5,5...6,5	≤0,35	0,35...0,55 V, 1,2...1,6 Mo	43,5...49,5 HRC	Штампы, прокатные валки
Нп-20Х14	0,16...0,25	≤0,8	≤0,8	13,0...15,0			34...39,5 HRC	Детали запорной арматуры
Нп-45Х4В3ГФ		0,8...1,2	0,7...1,0	3,6...4,6			39,5...46,5 HRC	
Нп-45Х2ВВГ	0,4...0,5	1,0...1,4	0,4...0,7	2,2...3,0	≤0,6	2,5...3,0 W, 0,2...0,4 V		Штампы, прокатные валки
Нп-Г13А	1,0...1,2	12,5...14,5	≤0,4	≤0,6		8,0...9,5 W, 0,3...0,5 V, 0,2...0,9 Ti	41,5...47,5 HRC	
							—	Крестовины стрелочных переводов, литье из стали Г13Л
							220...280 HB	

#### 14.5. Проволока стальная сварочная сплошного сечения, рекомендуемая для наплавки (по ГОСТ 2246–70)

Марка проволоки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	прочих			
Св-08	≤0,10	0,35...0,60	≤0,03	≤0,15	≤0,3		120...160 HB	Оси, валы, шпинNELи	
Св-08Г2С	0,05...0,11	1,80...2,10	0,70...0,95	≤0,2	≤0,25		180...210 HB		
Св-18ХГС	0,15...0,22	0,80...1,10	0,90...1,20	0,8...1,1	≤0,3		240...300 HB		
Св-20Х13	0,16...0,24	≤0,6	≤0,6	12,0...14,0	—		42...48 HRC	Детали запорной арматуры	
Св-10Х17Т	≤0,12	≤0,8	≤0,7	16,0...18,0	≤0,6	0,2...0,5Ti		Детали, работающие в условиях коррозии	
Св-06Х19Н9Т	≤0,08	1,0...2,0	0,4...1,0	18,0...20,0	8,0...10,0	0,5...1,0 Ti	160...190 HB		
Св-08Х20Н9Г7Т	≤0,1	5,0...8,0	0,5...1,0	18,5...22,0		0,6...0,9 Ti			

#### 14.3.3. Порошковая наплавочная проволока

Порошковая проволока (ПП) представляет собой тонкостенную металлическую оболочку, заполненную легирующими и шлакообразующими порошками, стабилизаторами дуги и раскисляющими компонентами. Она позволяет получать наплавку практически любого заданного состава (табл. 14.6 и 14.7). Наиболее часто применяют ПП диаметром 1,6...3 мм с использованием дугового процесса в защитных газах открытой дугой или под флюсом.

#### 14.6. Рекомендуемые области применения наплавляемых ПП

Условия работы	Рекомендуемые марки проволок
Аbrasивный износ	ПП-АН120 (40), ПП-АН126 (45), ПП-АН135 (56), ПП-ИТС-02 (57), ПП-У10Х4Г2Р (60)
Аbrasивный износ, сопровождающийся большими удельными давлениями и ударными нагрузками	ПП-АН135 (56), ПП-АН125 (56), ПП-АН170 (65), ПП-АН170П (63)
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях	ПП-TH250 (27), ПП-АН121 (36), ПП-АН105 (20), ПП-АН103 (44)
Износ от трения по металлу при больших давлениях и повышенных температурах. Термическая усталость	ПП-25Х5ФМС (50), ПП-АН130 (45), ПП-3Х2В8 (48), ПП-АН132 (50), ПП-20Х4В10НЧФТ-0(43), ПП-АН104 (44)
Интенсивный износ под ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	ПП-ИТС102 (57), ПП-АН106 (48), ПП-АН133 (32), ПП-АН138 (26)

## 14.7. Химический состав наплавленного металла ПП (ГОСТ 26101-84)

Марка (старое обозначение)	Способ на- плавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	прочих		
ПП-Нп-14ГСТ (ПП-ТН250)	С	≤0,14	0,3...0,8	0,3...0,8	—	—	0,2...0,6	—	220...280 HB	Оси, валы	
ПП-Нп-18Х1Г1М (ПП-АН120)	Ф	0,14...0,20	1,2...1,8	≤0,8	1,2...1,8	0,3...0,6	—		280...380 HB		
ПП-Нп-30Х5Г2СМ (ПП-АН122)	С	0,3...0,5	1,4...2,2	0,5...1,0	4,4...6,5	0,6...1,0	0,15...0,6		49,5...57 HRC	Коленчатые валы, крестови- ны карданов	
ПП-Нп-100Х4Г2АР	Ф	0,6...1,1	1,5...3,0	1,5...2,0	3,0...6,6	—	—	0,2 N, 0,15...0,6 В	45,5...55 HRC	Катки, натяжные колеса гусенич- ных тракторов	
ПП-Нп-200ХГР (ПП-АН160)	С	2,2...2,5	0,6...1,3	0,9...1,5	0,2...0,6		0,1...0,2	0,07...0,14 В	41,5...49,5 HRC	Коленчатые валы из высоко- прочного чугуна	
ПП-Нп-25Х5ФМС	Ф	0,2...0,3	0,4...0,9	0,8...1,3	4,7...6,0	1,0...1,5	—	0,3...0,6	—	41,5...51,5 HRC	Валки горячей прокатки, ножи, штаммы
ПП-Нп-30Х4В2М2ФС (ПП-АН132)		0,25...0,4	0,5...1,2	0,7...1,2	3,1...4,5	2,3...3,4		0,2...0,7	1,8...2,5 W	47,5...52,5 HRC	
ПП-Нп-35В9Х3СФ (ПП-3Х2В8)		0,27...0,4	0,6...1,1	0,2...1,0	2,2...3,5	—		0,2...0,4	8,0...10,5 W	42,5...54,5 HRC	
ПП-Нп-10Х14Т (ПП-АН106)	С	0,1...0,2	0,3...0,8	0,2...0,6	13,0...15,0	0,1...0,3	—	—	39,5...47,5 HRC	Плунжеры гидропрессов	
ПП-Нп-200Х12ВФ (ПП-АН104)	Ф	1,6...2,1	≤0,8	≤0,4	11,0...13,0	—	0,15...0,35	0,9...1,5 W	41,5...49,5 HRC	Ролики рольган- гов, керны клем- щевых кранов	
ПП-Нп-200Х15С1ГРТ (ПП-АН104)	С	1,5...2,2	0,8...1,5	1,0...2,0	14,0...20,0	—	0,2...0,8	0,5...0,8 В	47,5...59 HRC	Детали, рабо- тающие в усло- виях абразивно- го изнашивания	
ПП-Нп-250Х10Б8С2Т (ПП-АН135)		2,3...3,6	—	1,5...2,5	8,0...11,0		0,5...1,2	7,0...12,0 Nb	51,5...59 HRC		
ПП-Нп-80Х20Р3Т (ПП-АН170)		0,5...1,2	≤1,0	≤1,0	18,0...23,0		0,1...0,8	2,7...3,6 В	59...63 HRC		
ПП-Нп-90Г13Н4 (ПП-АН105)		0,7...0,9	13,0...15,0	0,1...0,3	—		—	3,5...4,0 Ni	160...240 HB	Крестовины стрелочных переводов, литье из стали Г13Л	

Окончание табл. 14.7

Марка (старое обозначение)	Способ на- плавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V		
ПП-Нп-10Х17Н9С5ГТ (ПП-АН133)	Ф	≤0,12	1,0...2,0	5,0...6,0	16,0...19,0	—	0,05...0,3	—	7,8...10,0 Ni	29...35,5 HRC
ПП-Нп-15Х13Н2Г2ВТ (ПП-АН134Г)		По ТУ 05416923.019-97								
ПП-Нп-07Х12Н3М2Г2 (ПП-АН163)		По ТУ 05416923.020-97								

Условные обозначения: Ф – наплавка под флюсом; С – наплавка без дополнительной защиты; ДВС – двигатели внутреннего сгорания.

#### 14.3.4. НАПЛАВОЧНЫЕ ЛЕНТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

В России ленточные электроды или ленты производятся толщиной 0,4...1 мм при ширине 20...100 мм (табл. 14.8 – 14.11).

Ленты подразделяются на стальные холоднокатаные, порошковые и металлокерамические. Все ленты изготавливаются по техническим условиям. Нередко для наплавки применяют стандартизованную стальную ленту, предназначенную для других целей (ГОСТ 4986–79). В последнее время разработана серия порошковых наплавочных лент (марки ПЛ), представляющих собой оболочку из низколегированных или специальных сталей с сердцевиной, заполненной шихтой из легирующих материалов и флюса. Металлокерамическую ленту изготавливают спеканием порошкообразных компонентов (марки ЛС), обеспечивая ей необходимые прочностные и пластические свойства.

Ленты поставляют потребителям в рулонах и применяют преимущественно при автоматической наплавке под флюсом.

#### 14.8. Рекомендуемые области применения наплавочных лент

Условия применения	Рекомендуемые марки лент <sup>1</sup>
Аbrasивный износ, сопровождающийся большими удельными давлениями и ударными нагрузками	ПЛ-АН126 (42), ПЛ-У25Х25Г3Ф2РН (54), ПЛ-У30Х30Г3ТЮ (50), ПЛ-АН171 (66), ПЛ-АН10 (54), ПЛ-У40Х38Г3РТЮ (52), ЛС-70Х3НМА (56), ЛС-20Х10Г10Т (24)
Износ от трения по металлу при больших давлениях и повышенных температурах. Термическая усталость	ПЛ-АН111 (60), ЛС-5Х4В3ФС (42), ЛС-5Х4В2М2ФС (46), ЛС-1Х14Н3 (48), Св-2Х13 (44)
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	ЛС-08Х21Н9Т, Св-04Х19Н11М3, ПЛ-АН150, Св-03Х22Н11Б6, Св-10Х16Н25АМ6, Св-08Х19Н10Г2Б, Св-04Х20Н10Г2Б, Св-07Х25Н13, Св-03Х15Н35Г7М6Б

<sup>1</sup> В наплавке лентами этих составов образуется austenитная структура с 2...8 % феррита.

#### 14.9. Химический состав ленты стальной холоднокатаной для наплавки под флюсом

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	прочих		
50Г	0,45...0,56	0,7...1,0	0,17...0,37	≤0,3	≤0,3	-	-	200...240 HB	Оси, валы, ролики
65Г	0,6...0,7	0,9...1,2		0,8...1,1	≤0,4		-	230...310 HB	
50ХФА	0,46...0,54	0,5...0,8					0,1...0,2 V	40...50 HRC	Штампы, ножи
50Х6ФМС	0,45...0,55	0,3...1,6	0,8...1,2	5,5...6,5	≤0,35	1,2...1,6	0,35...0,55 V	45,5...51,5 HRC	Прокатные валки
Св-20Х13	0,16...0,24	≤0,6	≤0,6	12,0...14,0	-	-	-	42...48 HRC	Плунжеры гидропрессов
Св-04Х19-Н11М3	≤0,6			18,0...20,0	10,0...12,0	2,0...3,0			
Св-10Х-16Н25АМ6	0,08...0,12	1,0...2,0		15,0...17,0	24,0...27,0	5,5...7,0	0,1...0,2 N	160...190 HB	Корпусные детали нефтехимического оборудования
Св-07Х25Н13	≤0,9			0,5...1,0	23,0...26,0	12,0...14,0	-		
Нп-02Х22Н11Г	≤0,02	1,2...1,8	0,2...0,4	21,0...23,0	10,5...11,5		-		

#### 14.10. Химический состав наплавленного металла с применением порошковой ленты для наплавки

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твердость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки		
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo				
ПЛ-Нп-10Г2СТ	С	0,1	2,0	1,0	—	—	0,2	—	—	20...26		
ПЛ-Нп-15Х4В2М2Г2СФТ		0,15			4,0		0,1	0,2	2,0 W, 0,5 V	28...36	Ролики рольгангов, тормозные шкивы, катки, колеса гусеничных тракторов	
ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2СТ (ПЛ-АН171)		1,2			22,0		1,0	3,0 В	65...68			
ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 (ПЛ-АН101)	У	3,0	1,0	3,0	25,0	2,0	—		Детали, работающие в условиях абразивного изнашивания			
ПЛ-Нп-300Х30Г3ТЮ	Ф			3,0	30,0	—	0,3	0,2 Al		50...56		
ПЛ-Нп-400Х38Г3РТСЮ				3,0	38,0					45...50		
ПЛ-Нп-450Х20Б7М6В2Ф (ПЛ-АН179)	С	4,5	—	2,0	20,0	—	6,0	7,0 Nb, 2,0 W, 1,0 V	55...62	Конусы и чаши доменных печей		
ПЛ-Нп-500Х40Н40С2Р (ПЛ-АН111)		5,0	1,0		40,0	40,0	—	0,2 В	54...62			

Окончание табл. 14.10

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твердость наплавленного металла, HRC	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	прочих		
ПЛ-Нп-12Х16Н0С5Г2Т (ПЛ-АН150)	Ф	0,12	2,0	5,0	18,0	9,0	0,2	—	—	27...34	Детали запорной арматуры
ПЛ-Нп-12Х16Н8М6С5Г4Б (ПЛ-АН151)			4,0		16,0	8,0	—	6,0	1,0 Nb	38...50	

Условные обозначения: Ф – наплавка под флюсом; С – наплавка без дополнительной защиты; У – универсальная.

#### 14.11. Химический состав ленты наплавочной спеченной на основе железа для износостойкой и коррозионно-стойкой стали

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твердость наплавленного металла, HRC	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	прочих		
ЛС-18ХГСА	0,3	0,7	0,9	1,1	—	—	—	0,3 Ti	24...32	Оси, валы
ЛС-70Х3НМ	1,0		0,7	4,5	1,0	0,9		—	54...60	Детали ходовой части автомобилей, ножи бульдозеров
ЛС-5Х4В3ФС	0,7	0,4	0,5	5,0	—	—	0,7	4,0 W	42...46	Прокатные валки
ЛС-25Х5ФМС	0,4		0,7	6,2		1,5	0,8	—	38...44	Ножи, штампы
ЛС-15Х13	0,22	0,5	0,5	16,5	—	—	—			Плунжеры гидропрессов
ЛС-12Х13Н2МФА	0,12	0,8	0,6	13,5		1,6	0,8	0,2	0,06 N	38...52
ЛС-02Х20Н11Г	0,025	2,0	20,0	11,0	—	—	—	—	—	Корпусные детали нефтехимического оборудования
ЛС-02Х20Н11Г2Б			1,8						0,3 Nb	
ЛС-02Х20Н14М3		1,5	—	20,0	13,5	2,5	—	—	—	

#### 14.3.5. ПРУТКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Литые прутки для наплавки износостойкого слоя на детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания, ударных нагрузок, повышенных температур или агрессивных средах, согласно ГОСТ 21449–75 подразделяются на пять марок (табл. 14.12, 14.13), и их изготавливают с номинальными диаметрами 4...8 мм и длиной 350...500 мм.

Широкое применение в судостроении и химическом машиностроении находит наплавка прутковыми материалами на основе меди. В табл. 14.12 приведены основные марки прутковых материалов, выпускаемых по ГОСТ 16130–90.

#### 14.3.6. ПЛАВЛЕНЫЕ КАРБИДЫ ВОЛЬФРАМА (РЕЛИТЫ)

Карбиды вольфрама применяют для особо износостойких наплавок, работающих в условиях абразивного износа с ударными нагрузками. Наплавку проводят восстановительным газовым пламенем, плазмой или в индук-

торах. Наплавленный слой характеризуется высокой твердостью (500...700 HV) и повышенной склонностью к образованию трещин и пор. Релитовые наплавочные материалы изготавливают по техническим условиям в виде зернового (З) или трубчато-зернового (ТЗ) релита (ТУ 48-42-34-70) и ленточного АН-ЛЗ (ТУ 26-02-769-77), каждый из которых может иметь шесть степеней зернистости (табл. 14.14).

Релитовые наплавочные материалы, так же как и сплавы с большим количеством кобальта, хрома и вольфрама, достаточно широко используются в наплавочных работах несмотря на их высокую стоимость. Они обладают отличной стойкостью против истирания, жаропрочностью и коррозионной стойкостью, износостойкостью, даже в условиях трения металла о металл без смазки и при работе в области высоких температур. Как правило, сплавы не имеют строго определенного химического состава, поскольку степень растворения твердых зерен карбида зависит от их размеров, температуры и времени пребывания в области критических температур.

### 14.12. Рекомендуемые области применения износостойких наплавочных литых прутков

Условия работы	Тип прутка	Марка	Твердость наплавки, HRC
Аbrasивный износ при 500 °C	У45Х28Н2СВМ	Пр-С27	52
То же, при 250 °C	У30Х28Н4С3	Пр-С1	50
То же, при ударном нагружении	У20Х17Н2	Пр-С2	44
Аbrasивный износ, эрозия, ударные нагрузки, химически активные среды при 750 °C (Пр-ВЗК-Р до 800 °C)	У10ХК63В5	Пр-ВЗК	40
	У20ХК57В10	Пр-ВЗК-Р	46

### 14.13. Наплавочные материалы из медных сплавов

Материал	Марки прутков	Рекомендуемое применение
Медь	М1Р, М2Р	Электротехническая промышленность, наплавка контактов
Латунь	ЛМц-58-2, ЛЖМц-59-1-1, ЛОК59-1-0,3	Судостроение, детали, подверженные коррозии
Бронза	МпЖКИ5-1-0,2-0,2	Для работы в морской воде
	2БрАМц9-2	В условиях, где необходимы коррозионная и износостойкость

#### 14.14. Релитовые наплавочные материалы

Размер зерна, мм	Зерновой, марка	Трубчато-зерновой			Ленточный		
		Марка	Длина, мм	Диаметр, мм	Марка	Ширина, мм	Толщина, мм
2,5...1,6	3-25	T3-25-7	390	7	АНЛЗ-25-9	9	4
1,6...0,9	3-16	T3-16-6		6	АНЛЗ-16-8	8	
0,9...0,63	3-9	T3-9-5		5	АНЛЗ-9-6	6	3
0,63...0,45	3-6	T3-9-4		4	АНЛЗ-6-5	5	2,5
0,45...0,28	3-4	T3-6-4			АНЛЗ-4-5		
0,28...0,18	3-2	T3-4-3			—		

Следует отметить особо, что сплавы содержащие большое количество кобальта, при наплавке склонны к образованию ГТ. Поэтому наплавляемые детали перед наплавкой желательно подогреть до 600...700 °C.

При наплавке сплавов, содержащих большое количество карбидов, необходимо выбирать режимы, обеспечивающие их минимальное растворение в матричном составе. Такие требования лучше всего обеспечиваются при газовой, индукционной или печной наплавке.

#### 14.4. ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НАПЛАВКОЙ

Практика эксплуатации и учет причин выхода из строя подавляющего большинства (90 %) машин показали, что причиной этого является поломка, повреждение поверхности или износ одной или нескольких пар сопрягаемых деталей. Их замена или восстановление продлевает ресурс всей установки иногда в несколько раз.

Ремонт, особенно капитальный, – понятие, гораздо более широкое, чем восстановление. Он включает в себя: дефектацию каждого узла машины, замену изношенных частей запасными, очистку, определение частей, подлежащих восстановлению, сборку, окраску, испытания, выдачу гарантийного талона.

Однако что касается машин, производимых мелкими сериями или единично, то в этом случае вышедшие из строя части рентабельнее восстанавливать.

Иногда это относится и к машинам, производимым серийно и даже массово. Имеет

смысль восстанавливать головки блока цилиндров, шатуны, коленчатые и распределительные валы и др.

Одним из основных технологических процессов восстановления является наплавка.

Выше были рассмотрены основные способы наплавки и даны материалы, с помощью которых можно получить необходимые свойства наплавленных поверхностей. При работах по наплавке следует иметь в виду, что в поверхностных слоях наплавленного металла возникают остаточные, как правило, растягивающие напряжения, которые могут привести не только к искажению формы и размеров наплавляемых деталей, но и к появлению трещин в самой наплавке.

Наплавку низколегированных и низкоуглеродистых сталей (до 0,4 % С) часто используют для восстановления размеров детали или создания подслоя. Особых проблем при наплавке таких сталей не возникает. Однако, если в наплавке количество углерода повышается до значений, более высоких, чем 0,4 %, то следует предусматривать подогрев, особенно при наплавке на массивные детали. Температура подогрева должна быть тем выше, чем массивнее деталь и больше углерода в ее составе.

При восстановлении деталей из хромомольфрамовых, хромомолибденовых и других теплостойких инструментальных сталей, особенно если наплавляемая деталь предназначена для работы в условиях сменных температур, чтобы исключить вероятность появления трещин, необходим предварительный подогрев до 300 °C. Часто рекомендуют последующее медленное охлаждение вместе с печью или последующий высокотемпературный отпуск.

Особенностью наплавки штамповых инструментальных сталей является протекание перлитного превращения в широких диапазонах скоростей охлаждения. Иногда после охлаждения образуется мартенситная структура с некоторым количеством остаточного аустенита – структура весьма твердая и износостойкая, затрудняющая дальнейшую механическую обработку.

Для восстановления наплавкой изделий из быстрорежущих сталей следует учитывать повышенную склонность металла к образованию ГТ и ХТ. Наплавленный металл, как правило, не должен подвергаться пластической деформации ковкой или прокаткой.

Низко- и высокоуглеродистые хромистые стали в наплавке в зависимости от количества хрома и углерода имеют ферритную или полуферритную, аустенитно-мартенситную структуру. Увеличение содержания углерода приводит к возникновению ледебуритной структуры.

Наплавка ледебуритных сталей X12, X12M, X12ВФ трудна из-за склонности наплавленного металла к образованию ХТ и ГТ, возникающих по границам зерен легкоплавких карбидных эвтектик. С увеличением в наплавке углерода до 1,2...1,5 % возрастает количество легкоплавкой эвтектики и трещины исчезают.

При наплавке ледебуритных хромистых сталей на малоуглеродистую в первом слое из-за относительно малого количества углерода возможно образование трещин. Из первого слоя трещины могут распространяться и в последующие слои. Следует выбирать такой режим наплавки, чтобы в первом слое перемешивание основного и присадочного металлов было минимальным. Твердость ледебуритной хромистой наплавки может быть чрезвычайно высокой; при температуре отпуска ~550 °C она может достигать 60 HRC.

Высокомарганцовистые аустенитные стали (110Г13Л) рекомендуют применять для деталей, работающих при абразивном изнашивании, сочетающемся с сильными ударами. Структура стали аустенитная, пластичность высокая наряду с хорошей прочностью. Твердость такой стали после закалки (950 °C) 180 НВ. В результате последующей деформации твердость возрастает до 500 НВ.

Наплавку таких сталей проводят с минимальным тепловложением (минимальные ток и напряжение). Для наплавки обычно используют проволоку Нп-Г13А или самозащитную порошковую проволоку ПП-Нп-90Г13Н4,

а иногда – подслой из наплавки типа Св-08Х10Н10ГБ.

Хромоникелевые и хромоникельмарганцовистые наплавки (коррозионно-стойкие стали) особо чувствительны к образованию ГТ и потере коррозионной стойкости в процессе эксплуатации. Поэтому при их наплавке стремятся к получению двухфазной структуры с минимальным содержанием вредных примесей. Иногда при наплавке рекомендуют промежуточные слои. Хорошие результаты дает применение проволоки типов Св-Х18Н10Т и Св-Х17Н13Н2Т. При использовании других проволок также стремятся иметь в наплавке запас феррита ≥2...3 %.

Одним из самых распространенных типов наплавочного металла с максимальной твердостью и хорошей износостойкостью является наплавка из высокохромистого чугуна, особенно чугуна, имеющего в составе первичные карбиды хрома типа  $\text{Me}_7\text{C}_3$ .

Наплавки такого типа склонны к образованию ХТ, особенно при наплавке на крупногабаритные детали. Существует мнение, что эти трещины практически не переходят в основной металл детали и не влияют на износостойкость. С целью снижения вероятности их появления применяют подогрев и предварительно наплавляют подслой.

Коррозионно-стойкие и жаростойкие никелевые сплавы, дополнительно легированные молибденом и хромом (хастелой или инконель), наплавляют в основном в виде порошков и реже – проволоки.

Обычно сложностей при наплавке этих материалов не возникает. Если наплавка проводится на закаливающиеся стали, требуется предварительный подогрев.

Никелевые сплавы с хромом, бором, кремнием характеризуются большой стойкостью в агрессивных средах одновременно с высокой износостойкостью. Особой сложности при наплавке они не представляют, так как имеют относительно невысокую температуру плавления (1000...1100 °C). Тем не менее, с целью лучшего сплавления подложку рекомендуется подогревать до температуры 300...500 °C.

#### 14.5. ДЕФЕКТЫ НАПЛАВКИ

Наиболее распространенным дефектом всех разновидностей наплавок, существенно снижающим эксплуатационные характеристики наплавленного слоя, являются трещины,

возникающие в наплавленном или основном металле. Чаще всего трещины возникают при наплавке на основной металл с неудовлетворительной свариваемостью или при очень высокой твердости наплавленного слоя, что связано с малой пластичностью металла в температурном интервале хрупкости (ГТ), с чрезмерно большими напряжениями в основном металле и наплавке, вызванными фазовыми превращениями при остывании (ХТ).

Вероятность возникновения трещин при наплавке, так же как и при сварке, определяется химическим составом основного и присадочного материалов, жесткостью наплавляемой конструкции, режимом наплавки и тесно связана с формированием первичной структуры и скоростью охлаждения. Кроме того, следует иметь в виду, что из-за различия коэффициентов термического расширения основного металла и наплавленного слоя существенно повышается вероятность их появления.

Металлографический анализ показал, что в большинстве случаев очагами разрушения в наплавленном металле являются микроскопические ГТ, возникающие в интервале температур кристаллизации и раскрывающиеся затем при остывании. Зародыши этих трещин проходят по зонам срастания кристаллитов, раскрытие их идет как по границам зерен, так и по телу зерна. ХТ могут образовываться и в основном металле в ЗТВ, и в самом валике, особенно в случае твердых наплавок.

Определить сопротивляемость образованию ХТ или ГТ можно количественно по методикам, разработанным в МВТУ (теперь МГТУ)

им. Н.Э. Баумана, на испытательных машинах типов ЛТП-1-6, ЛТП-2-5; иногда для этой цели используют опытную наплавку на жесткую конструкцию. Существуют косвенные расчетные методы определения склонности к ГТ при наплавке.

Для расчета склонности к образованию ХТ иногда применяют следующую методику: подсчитывают углеродный эквивалент по уравнению  $C_3 = C + 1/6 Mn + 1/24 Si + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/4 Mo + 1/14 Nb$ . Учитывая, что между углеродными эквивалентами  $C_3$  и максимальной твердостью существует почти линейная зависимость, по формуле  $HV = 660C_3 \pm 40$  с достаточной точностью определяют твердость HV, а затем, пользуясь экспериментальными данными, – требуемую температуру подогрева:

Значения HV	Требуемая температура подогрева, °C
До 200	Без подогрева
200...250	По необходимости
250...325	150...250
325	250

В наплавке нередко появляются поры, вызванные: загрязнением наплавочных материалов, их влажностью, применением чрезмерно больших токов, длинной дуги или нарушением защиты. Дефекты типа подрезов, шлаковых включений, излишней деформации изделия, несплавлений вызваны в основном неправильно назначенным режимом наплавки или его несоблюдением.

## Глава 15

# ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

### 15.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОКРЫТИЯХ

Покрытие – искусственно сформированный на поверхности изделия или конструкции слой, отличающийся от материала основы химическим составом, теплофизическими и физико-химическими свойствами. По характеру расположения на поверхности покрытия подразделяются на *диффузионные* (или внедренные) и *наслоенные*.

*Наслоенное покрытие* – это покрытие, сформированное на внешней поверхности изделия или конструкции, имеющее четкую границу раздела с основой.

*Диффузионным* называется покрытие, полученное внедрением в материал основы без существенного изменения начальных размеров изделия.

Возможны покрытия, носящие промежуточный характер (диффузионно-наслоенные).

В последние годы требования к покрытиям усложнились. Перспективны покрытия сложного состава, с гомогенным и гетерогенным строением, а также композиционные. Возросли требования к качественным показателям: химической однородности, плотности, прочности сцепления покрытия с подложкой (адгезионной и когезионной прочности), равномерности по толщине и т.д., наметились тенденции к получению покрытий с заданной переменной толщиной, регулируемым фазовым составом, с избирательными свойствами.

Существующие методы нанесения покрытий делятся на следующие основные группы: твердофазное плакирование, погружение в расплавленные соли, химическое осаждение, электрохимическое осаждение, газотермическое напыление, вакуумно-конденсационное напыление, диффузионное насыщение. В данной главе рассмотрим методы нанесения покрытий, в которых используются такие источники теплоты как газопламенные, дуговые, плазменные, электронно-лучевые, широко применяемые для сварочных процессов, т.е.

методы газотермического и вакуумного конденсационного напыления.

Применение покрытий различного назначения в последнее время резко расширилось, особенно защитных покрытий, которые с позиций эксплуатации условно можно разделить на коррозионно- и жаростойкие, теплозащитные, износостойкие (включая упрочняющие), а также покрытия с особыми тепло-, электрофизическими и оптическими свойствами.

### 15.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ГАЗОТЕРМЕСКОГО И ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, переносящего их на поверхность обрабатываемого изделия при оптимальных для формирования слоя покрытия значениях температуры и скорости. При использовании компактного состояния исходного напыляемого материала в виде порошка, проволоки, прутка, шнура или прокачиваемого расплава газотермическое диспергирование происходит непосредственно в процессе напыления.

**Вакуумное конденсационное напыление (осаждение).** Покрытие формируется из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или их ионизированном состоянии. Для получения потока пара (частиц) используют различные источники энергетического воздействия на материал. Различают формирование потока частиц посредством термического испарения материала, ионным распылением или взрывным испарением – распылением. Соответственно этому вакуумное конденсационное напыление разделяют на методы. При ионизации потока напыляемых частиц реализуется способ ионно-плазменного напыления, а при введении в поток реактивного газа – вакуумное конденсационное напыление.

Несмотря на существенные различия процессов газотермического и вакуумного конденсационного напыления покрытий, в их технологии просматриваются и общие элементы, например: подготовка напыляемой поверхности; получение равномерных по толщине покрытий; последующая обработка запыленных изделий и др. Целесообразно также рассматривать с единых позиций технологию напыления покрытий из различных групп материалов.

#### 15.2.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Классификация способов газотермического напыления по применению источников энергии представлена на рис. 15.1.

##### 15.2.1.1. ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

При плазменном нанесении покрытий из порошков плавление исходного материала происходит в плазменной струе, температура которой  $(5\dots50) \cdot 10^3$  К. Плазменную струю получают различными способами. В основном используют дуговой подогрев газа, реже – высокочастотный индукционный. В качестве плазмообразующих газов применяют: аргон, азот, водород, аммиак, водяной пар, воздух, гелий и другие газы, а также их смеси. Частицы исходного порошка, попадая в плазменную струю, расплавляются и переносятся на поверхность обрабатываемого изделия.

Применяя плазму – высокоэнталпийный и высокотемпературный источник нагрева, – можно наносить покрытия практически из всех тугоплавких материалов, которые в плазменной струе не сублимируют и не претерпевают интенсивного разложения.

Достаточно перспективны для напыления сверхзвуковые плазменные струи. Высокие скорости напыляемых частиц ( $\geq 800\dots1000$  м/с) дают возможность формировать покрытия без расплавления.

Современный уровень плазменного напыления в основном базируется на использовании дозвуковых и сверхзвуковых, турбулентных, осесимметричных, плазменных струй с широким диапазоном теплофизических свойств. На нагрев плазмообразующего газа расходуется около половины мощности, подводимой к распылителю. Обычно тепловой КПД распылителя составляет  $0,4\dots0,7$ . Следует также отметить слабое использование плазменной струи как источника теплоты на нагрев порошковых частиц. Эффективный КПД их нагрева плазмой находится в пределах  $\eta_i = 0,01\dots0,15$ . При распылении проволоки  $\eta_i = 0,2\dots0,3$ .

Для напыления применяют в основном плазменные струи, получаемые в дуговых плазмотронах, в которых источником нагрева газа является дуга, горящая между водоохлаждаемыми электродами. Различают порошковые и проволочные способы плазменного напыления (рис. 15.2). Процесс плазменного напыления легко механизируется и автоматизируется.

По степени защиты процесса различают плазменное напыление: без защиты, с местной защитой и общей.

Плазменное напыление без защиты ведется на воздухе без изоляции плазменной струи, потока напыляемых частиц и пятна напыления. При этом создаются благоприятные условия для попадания воздуха в зону протекания процесса, несмотря на применение инертных плазмообразующих газов.

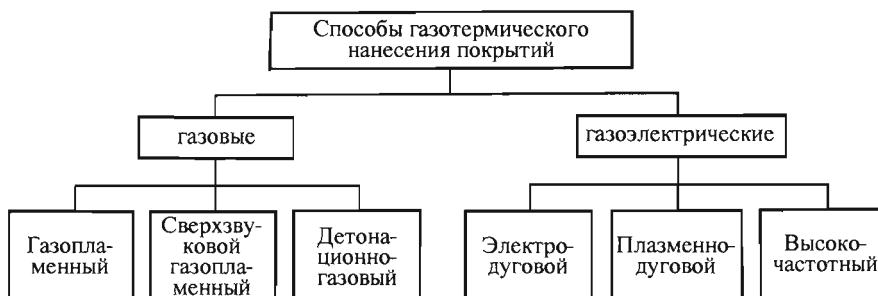


Рис. 15.1. Классификация способов газотермического напыления покрытий

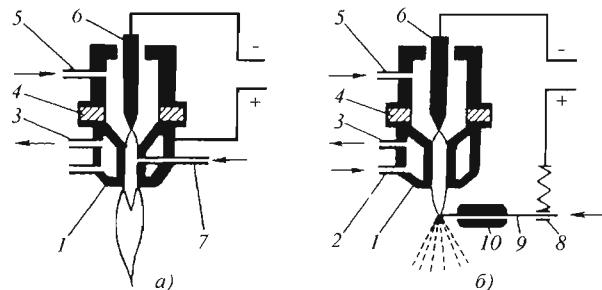


Рис. 15.2. Схема процесса плазменного напыления:

а – для работы на порошках; б – для работы на проволоке;

1 – сопло плазменной струи (анод); 2, 3 – подвод и отвод охлаждающей воды; 4 – изолирующее кольцо; 5 – подвод плазмообразующего газа; 6 – вольфрамовый электрод (катод); 7 – подача напыляемого порошка; 8 – контактное устройство для проволоки; 9 – напыляемая проволока (анод); 10 – направляющая трубка для проволоки

При плазменном напылении с местной защитой применяют местные камеры или кольцевую газовую защиту с использованием дополнительных сопловых устройств. Достаточно надежен способ защиты при использовании насадок на сопловую часть распылителя.

Плазменное напыление с общей защитой ведется в камере, атмосфера в которой формируется из плазмообразующего газа. Способ применяется для нанесения покрытий ответственного назначения.

Используют два способа с общей защитой: при нормальном давлении газа в камере (небольшое избыточное давление) и при пониженном давлении (100...2000 Па). Последний называют плазменным напылением в динамическом вакууме. Истечение плазменной струи происходит в вакуумную камеру, из которой непрерывно откачиваются рабочие газы. При этом скорость струи превышает скорость звука в 2 – 3 раза, скорость частиц напыляемого материала увеличивается до 800...1000 м/с. В этом случае получаются более плотные, чем обычно, покрытия, характеризующиеся прочным сцеплением с основным материалом детали.

Плазменному напылению свойственно особенно большое число параметров.

*Конструктивные параметры* распылителя: диаметр сопла  $d_c$ , обычно равный 3...8 мм; длина канала сопла  $l_c = (2...6)d_c$ ; профилюирование канала сопла; заглубление электрода в сопле; длина привязки самоустанавливающегося или фиксированного анодного пятна; характер и место ввода распыляемого материала относительно среза сопла; диаметр неплавящегося электрода; угол заточки и диаметр притупления электрода.

*Энергетические параметры*, характеризующие режим работы плазменного распылителя, – энталпия, температура и скорость плазменной струи. Они являются определяющими в нагреве распыляемого материала. С увеличением мощности дуги в дуговых плазмотронах интенсивно возрастают температура и энталпия плазменной струи. Расход плазмообразующего газа оказывает большое влияние на эффективность процесса напыления. С увеличением расхода повышаются распыляющая способность плазменной струи, ее скорость и, соответственно, скорость напыляемых частиц. При возрастании расхода плазмообразующего газа свыше оптимальных значений существенно падают плотность покрытий и коэффициент использования порошка. При плазменном напылении объемный расход плазмообразующего газа 2,0...4,0 м<sup>3</sup>/ч, соответственно, массовый 0,5...2,0 г/с.

Особенно сильно на теплофизические характеристики плазменной струи и условия теплообмена при порошковом напылении влияет род газа (рис. 15.3). Несмотря на высокую температуру, аргоновая струя слабо разогревает порошковые частицы. Более высокая степень прогрева напыляемых частиц достигается при использовании азота и особенно газов, содержащих водород.

Для плазменного напыления применяют порошок со средним диаметром частиц 10...200 мкм. Массовый расход порошка составляет  $Q_{\text{по}} = 0,25...2$  г/с. Другим показателем является скорость частиц в транспортирующем канале, которая близка к скорости транспортирующего газа и составляет 2...4,5 м/с. Эта

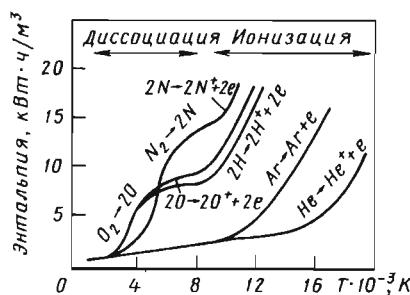


Рис. 15.3. Зависимость теплосодержания плазмообразующих газов от температуры

скорость определяет глубину проникновения частиц в плазменную струю. Для подачи порошка используют газы, аналогичные плазмообразующим. Расход транспортирующего газа ~10 % от расхода плазмообразующего газа.

Оптимальная дистанция плазменного напыления зависит от режима работы плазмотрона и изменяется в пределах 50...300 мм. Малые дистанции напыления, близкие к длине начального участка плазменной струи, не всегда обеспечивают прогрев порошковых частиц и придаче им необходимой скорости. Вместе с тем, возрастают опасность недопустимого нагрева напыляемого изделия. Наибольшие значения дистанции напыления характерны для ведения процесса с использованием ламинарной плазмы или низкого давления в камере. Существенно возрастает дистанция напыления с увеличением мощности дуги.

Большое влияние на температуру в пятне напыления оказывает скорость перемещения распылителя. Обычно она находится в пределах 0,05...1,0 м/с.

Плазменное напыление предназначено для нанесения покрытий различного назначения распылением порошковых и проволочных материалов. Как правило, толщина покрытий находится в пределах 0,3...2,0 мм со средней разнотолщинностью 20 %.

Основные достоинства метода:

- высокая производительность процесса, составляющая 2...8 кг/ч для плазмотронов мощностью 20...60 кВт до 50...80 кг/ч при более мощных распылителях (150...200 кВт);
- универсальность по распыляемому материалу (проводка, порошок с различной температурой плавления);
- большое число параметров, обеспечивающих гибкое регулирование процесса напыления;

- регулирование в широких пределах качества напыляемых покрытий, а кроме того, получение особо качественных при ведении процесса с общей защитой;

- высокие значения коэффициента использования материала (КИМ): 0,7...0,85 при напылении проволочных материалов и 0,2...0,8 – порошковых;

- возможность комплексной механизации и автоматизации процесса.

Недостатки метода:

- невысокие значения коэффициента использования энергии: 0,02...0,18 при напылении проволочных материалов и 0,001...0,02 – порошковых;

- наличие пористости и других видов несплошностей (2...15 %);

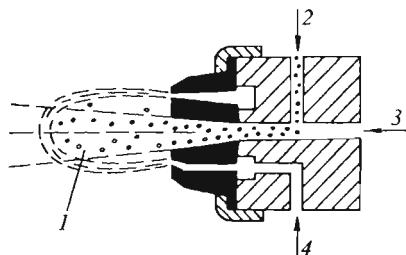
- сравнительно малая адгезионная и когезионная прочность покрытия: максимальные значения 80...100 МПа;

- высокий уровень шума при открытом ведении процесса (60...120 дБ).

#### 15.2.1.2. ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

В газопламенных процессах нанесения покрытий используется тепло, выделяющееся при сгорании горючих газов (ацетилена, пропан-бутана, водорода, метана, природного газа и др.) в смеси с кислородом или сжатым воздухом (рис. 15.4). В зависимости от того, были или не были перемешаны горючий газ и окислитель до подачи в зону горения, различают предварительно перемешанное и диффузионное пламя. Температура продуктов сгорания горючих газов при использовании в качестве окислителя кислорода 2000...3100 °C. Наиболее высокая температура пламени достигается при использовании ацетилено-кислородных смесей. Однако теплотворная способность выше у пропана и бутана, поэтому для напыления чаще всего применяют технический ацетилен (ГОСТ 5457-75) или пропан-бутановую смесь (ГОСТ 20448-80). При образовании газопламенных струй тепловой КПД распылителя достаточно высок (0,8...0,9). В этом случае большая часть подведенной энергии расходуется на нагрев газа. Однако эффективный КПД нагрева порошковых частиц составляет всего лишь 0,01...0,15.

Давление горючего газа ( $p_{г.г}$ ) определяет его расход и стабильность подачи. Обычно рекомендуется  $p_{г.г} = 0,03...0,05$  МПа. При этом расход горючего газа  $Q_{г.г} = 1...2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Большую



**Рис. 15.4. Схема процесса газопламенного нанесения покрытий из порошковых материалов:**

- 1 – газовое пламя;
- 2 – подача порошка;
- 3 – подача сжатого воздуха;
- 4 – подвод горючей смеси газов

роль играет отношение расхода кислорода к горючему газу ( $\beta$ ). В практике напыления  $\beta = 1,1 \dots 4,0$ : нижний предел для ацетилена, верхний для пропан-бутановой смеси. Значение  $\beta$  определяет физико-химические свойства пламени. Увеличение расхода горючего газа при выбранном  $\beta$  приводит к возрастанию тепловой мощности газового пламени, его скорости и длины высокотемпературной части потока. Для газопламенного напыления используют кислород (ГОСТ 5583–79) под давлением 0,35...0,45 МПа. Его расход  $\geq 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для обжигания пламени давление газа (воздуха) составляет 0,3...0,4 МПа, его расход 30...40 м/ч.

**Параметры распыляемого материала и его ввода в газовое пламя.** Дисперсность порошковых частиц, подаваемых в газовое пламя, 10...100 мкм. Более крупные порошки нагреваются недостаточно. Расход порошка 0,5...3,0 кг/ч. Во многих случаях порошок подается в газовое пламя за счет собственной массы в сочетании с инжектированием струи. При этом стремятся к минимальной длине коммуникационных каналов. В других случаях порошок подается дополнительным транспортирующим газом: кислородом или воздухом. Применение инертных газов уменьшает окислительный потенциал пламени. Давление транспортирующего газа выбирают в пределах 0,1...0,2 МПа, а расход 0,3...0,6 м<sup>3</sup>/ч. Диаметр проволоки при газопламенном напылении 1...5 мм. Скорость подачи находится в пределах 180...500 м/ч (5...30 кг/ч). Максимальную производительность процесса получают при высоких мощностях газового пламени и больших диаметрах проволоки.

Важным параметром для газопламенного процесса является дистанция напыления.

Влияние этого параметра аналогично для всех методов газотермического напыления. В рассматриваемом методе она составляет 100...200 мм; скорость перемещения пятна напыления 0,2...0,3 м/с.

Температура напыляемых частиц при порошковых способах напыления  $\leq 2200^\circ\text{C}$ , при проволочном  $2700^\circ\text{C}$ . Скорость частиц вблизи поверхности напыления 15...50 м/с; плотность потока напыляемых частиц  $10^3 \dots 10^5 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

К преимуществам метода следует отнести:

- наличие несложного и недорогого оборудования;
- удовлетворительные показатели КИМ при проволочном распылении.

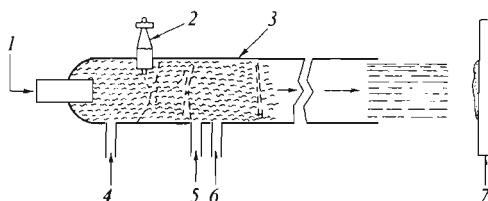
Недостатки метода:

- невысокая производительность процесса, особенно при порошковом напылении;
- наличие в струе активных газов, взаимодействующих с металлическими металлоподобными материалами;
- плохое качество покрытий из порошковых материалов;
- низкие значения эффективного КПД нагрева частиц.

В качестве распыляемого материала при газопламенном напылении используют также гибкие шнуры с полимерной оболочкой, заполненные порошками, и порошковые проволоки. Наблюдается тенденция к использованию мелкодисперсных порошков. Для обеспечения более высоких скоростей напыления частиц создаются газопламенные распылители, обеспечивающие ускорение газопламенных потоков до сверхзвуковых и даже гиперзвуковых скоростей. Это обеспечивает получение покрытий с низкой пористостью (2,0...3,0 %) и с порами малого размера ( $\leq 10 \text{ мкм}$ ); адгезионной прочностью на уровне 36 МПа и шероховатостью  $Ra 25 \dots 30 \text{ мкм}$ .

#### 15.2.1.3. ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Для нагрева и ускорения распыляемых частиц в промышленности все шире используют импульсные источники энергии, в частности энергию взрыва. Наиболее широко применяют напыление покрытий с помощью энергии взрыва газовых смесей (детонационно-газовое). На рис. 15.5 показана схема детонационной пушки. Время протекания детонации ~5 мс. Как детонационная волна, так и продукты ее



**Рис. 15.5. Устройство детонационной пушки:**  
1 – ввод порошка; 2 – свеча зажигания;  
3 – корпус пушки; 4 – напуск азота;  
5 – напуск ацетилена; 6 – вход для кислорода;  
7 – подложка

распада обладают высокой скоростью распространения ( $800\ldots1200$  м/с) и достаточно высокой температурой ( $3\ldots5 \cdot 10^3$  К). Тепловая мощность детонационных газовых струй достигает  $10\ldots10^4$  кВт. Из них наиболее высокая для ацетилено-кислородных смесей. Обычно расход ацетилена и кислорода  $0,2\ldots6,0$  м<sup>3</sup>/ч, в зависимости от конструкции установки и давления применяемых газов ( $0,05\ldots0,15$  МПа). Протекание детонационного взрыва и теплофизические параметры продуктов реакции легко регулируются введением в состав горючей смеси различных технологических добавок (argon, азот и др.).

Эффективный КПД нагрева порошковых частиц  $0,1\ldots0,15$ . Наибольшее влияние на эффективность процесса оказывают диаметр ствола, его длина и форма. Калибр ствола выбирают в пределах 8…40 мм. Часто применяют пушки с диаметром 16…20 мм, длиной ствола в пределах 1200…2000 мм. Обычно используют порошки со средним диаметром 10…50 мкм. Количество подаваемого порошка изменяется в широких пределах ( $0,5\ldots10$  кг/ч) в зависимости от мощности установки. За один цикл выбрасывается  $\sim 50\ldots100$  мг. Чрезмерное увеличение порции порошка является главной причиной снижения качества покрытий в основном из-за больших различий в температуре и скорости частиц. Дистанция напыления задается исходя из материала изделия, его размеров и форм распыляемого материала, толщины покрытия и изменяется от 50 до 200 мм. Оптимальная толщина покрытия  $0,1\ldots0,5$  мм.

Детонационно-газовые покрытия успешно используются для упрочнения нагруженных поверхностей деталей. Они отличаются высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами (максимальная адгезионная и когезионная прочность  $100\ldots160$  МПа, пористость, как правило,  $<1\%$ , высокая усталостная

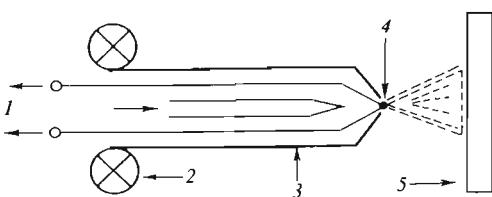
прочность, обусловленная наклепом). К достоинствам данного метода можно также отнести: возможность напыления покрытий на холодные изделия ( $<200$  °C), умеренный нагрев изделий при их напылении ( $<300$  °C), достаточно высокую производительность (1…10 кг/ч) и широкую номенклатуру распыляемых материалов, невысокую чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления.

Недостатки метода состоят в следующем: в трудности нанесения покрытий на изделия, имеющие большую поверхность и высокую поверхностную твердость ( $\geq 60$  HRC); сложности напыления покрытия из порошков с невысокой удельной массой (карбиды титана и др.); высоком уровне шума ( $\geq 140$  дБ); необходимости применения герметичных боксов и дистанционного управления процессом; достаточно высокой стоимости оборудования.

#### 15.2.1.4. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

При электродуговой металлизации поток напыляемых частиц образуется при плавлении распыляемого материала высокоамперной дугой (рис. 15.6). Для диспергирования расплавленного металла используют скоростной поток сжатого воздуха. Энергетический КПД распыления при электродуговой металлизации обладает наиболее высокими значениями из всех методов газотермического напыления и составляет  $0,7\ldots0,9$ .

Широкое распространение для напыления покрытий получила двухэлектродная схема, иногда применяется и трехэлектродная. Для распыления в основном используют цилиндрические сопла диаметром 3…6 мм при расходе газа до  $50\ldots60$  м<sup>3</sup>/ч. Более совершенны цилиндрические сопла в сочетании с расширяющейся конической частью. Угол скрещивания электродов, как правило, составляет  $\sim 30^\circ$ .



**Рис. 15.6. Схема процесса электродугового напыления:**

- 1 – источник постоянного тока;
- 2 – катушки с проволокой;
- 3 – подача проволоки;
- 4 – дуга;
- 5 – подложка

В практике электродуговой металлизации используют мощности 5...20 кВт, ток дуги 80...600 А, напряжение 18...35 В. Давление распыляющего газа (обычно воздуха) выбирают равным 0,35...0,6 МПа. При этом его расход 60...150 м<sup>3</sup>/ч. Диаметр электродной проволоки выбирают в пределах  $\geq 1\ldots 3,5$  мм. Скорость подачи проволоки 0,05...0,35 м/с. Скорость потока напыляемых частиц 50...150 м/с, при этом большинство частиц поступает на поверхность напыления в расплавленном состоянии.

Наиболее широкое применение электродуговая металлизация нашла при создании коррозионно-стойких покрытий на различных строительных сооружениях. Основным преимуществом метода является его высокая производительность, достигающая 50 кг/ч. Благодаря большим значениям энталпии напыляемых частиц могут быть получены хорошие покрытия с достаточно высокой адгезионной и когезионной прочностью и низкой пористостью.

К недостаткам следует отнести интенсивное взаимодействие частиц с активной газовой фазой. Напыленный металл насыщен кислородом и азотом, а также содержит значительное количество оксидов. Использование для напыления только проволоки ограничивает возможности метода.

#### 15.2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Методы вакуумного конденсационного напыления классифицируют по различным признакам:

- способом распыления материала и формирования потока частиц (термическим испарением материала из твердого или расплавленного состояния, взрывным, испарением-распылением, ионным распылением твердого материала);

- энергетическому (зарядовому) состоянию частиц [нанесение (нейтральными частицами, атомами, молекулами) с различным их энергетическим состоянием, напыление ионизированными частицами, напыление ионизированными ускоренными частицами];

- способу взаимодействия напыляемых частиц с остаточными газами в камере [напыление в инертной разреженной среде или высоком вакууме ( $10^2\ldots 10^3$  Па), напыление в активной разреженной среде (10...100 Па)].

Введение в камеру активных газов позволяет перейти к способу вакуумного реакционного нанесения покрытий. Частицы в потоке или на поверхности конденсации вступают в химическое взаимодействие с активными газами (кислородом, азотом, оксидом углерода и др.) и образуют соответствующие соединения: оксиды, нитриды, карбиды и др.

Схематическая классификация вакуумного конденсационного нанесения (ВКН) покрытий показана на рис. 15.7. Выбор метода и его разновидностей определяется требованиями, предъявляемыми к покрытиям с учетом экономической эффективности, производительности, простоты управления, автоматизации и др. Наиболее перспективны способы ВКН с ионизацией потока напыляемых частиц, стимулированные плазмой. Часто их называют ионно-плазменными.

Преимущества ВКН заключаются: в высоких физико-механических свойствах покрытий, возможности получения покрытий из синтезированных соединений (карбидов, нитридов, оксидов и др.), нанесении тонких и равномерных покрытий, использовании для напыления широкого класса неорганических материалов. Эти методы не загрязняют окружающую среду и не нарушают экологию.



Рис. 15.7. Классификация методов и способов ВКН покрытий

К недостаткам методов ВКН следует отнести: невысокую производительность процесса (скорость конденсации ~1 мкм/мин), повышенную сложность технологии и оборудования, низкие показатели энергетических коэффициентов распыления и напыления.

### 15.3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Технология нанесения покрытий представляет собой совокупность операций, в результате последовательного выполнения которых на поверхности изделий формируются слои с заданными характеристиками и заданной прочностью сцепления. Технологическая схема получения покрытия показана на рис. 15.8.

В соответствии с типом покрытия и условиями эксплуатации выбирают: его состав, толщину, метод и способ напыления и другие технологические особенности.

При выборе состава покрытия необходимо наряду с эксплуатационными требованиями учитывать их совместимость с материалом напыляемого изделия. Под совместимостью следует понимать принципиальную возможность адгезионного взаимодействия материалов покрытия и напыляемого изделия.

Для повышения качества покрытий иногда прибегают к напылению подслоя. Необходимость в этом возникает при неудовлетворительной совместимости материала покрытия с

напыляемым изделием. Особенно часто несовместимость проявляется в низкой адгезионной прочности; образовании на границе раздела промежуточных фаз, снижающих эксплуатационные свойства напыляемых изделий; большом различии в температурных коэффициентах линейного расширения материала покрытия и изделия и т.д.

Практика показала хорошие результаты при использовании для промежуточных слоев тугоплавких металлов (молибдена), а также композиционных термореагирующих порошков, например плакированных или конгломерированных частиц никеля и алюминия.

Широко применяется технология вакуумного конденсационного напыления с переменным составом по толщине покрытия. Вакуумные методы позволяют легко управлять составом покрытия. При выборе способа напыления покрытия немаловажное значение имеет производительность процесса. В этом отношении газотермические способы намного предпочтительнее по сравнению с вакуумными.

**Подготовка порошков.** Большинство порошков для напыления поставляют в специальной таре. Для определения размера частиц часто используют ситовый анализ. Набор сит с размером ячеек 0,05; 0,063; 0,1; 0,125 мм позволяет простым способом оценить гранулометрический состав порошка.

Обязательной операцией при подготовке порошков является сушка или прокаливание до температур 120...150 °C. Оксидные порошки прокаливают при температуре 600...700 °C. Время обработки выбирают в пределах 2...5 ч.

**Подготовка поверхности напыляемых изделий.** Качество обработки поверхности изделий перед напылением во многом гарантирует высокую прочность сцепления частиц порошка с поверхностью детали.

Детали должны поступать сухими и чистыми при температуре ≥10 °C для предотвращения образования на поверхности конденсата. Для этого их очищают от грязи и масла химическим обезжириванием в щелочных растворах, а затем сушат. Составы обрабатывающих растворов и режим обработки выбираются в соответствии с ГОСТ 9.402-80. Особенно эффективно электрохимическое обезжиривание в щелочных растворах того же состава, что и при химическом обезжиривании. После очистки (в случае необходимости удаления следов износа и придания детали правильной геометрической формы) их подвергают механической обработке.

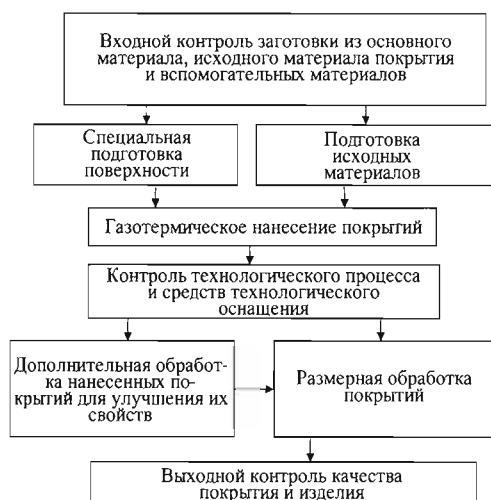


Рис. 15.8. Технологическая схема получения газотермических покрытий

Подготовку напыляемой поверхности следует проводить с таким расчетом, чтобы наряду с очисткой осуществлялся и процесс ее активации, т.е. повышение энергии поверхностных атомов до уровня обеспечения их химического взаимодействия с напыляемыми частицами. Выбор способа подготовки зависит от материала напыляемого изделия, его конструкции и метода напыления. Основной подготовительной операцией является образование на поверхности необходимой шероховатости, которая существенно влияет не только на прочность сцепления напыляемого слоя с подложкой, но и на усталостную прочность детали. При газотермических методах требуется шероховатость напыляемой поверхности в пределах  $Rz 20...80 \text{ мкм}$  (меньшие значения – для детонационного напыления; большие – для других методов). Шероховатость при вакуумных конденсационных методах напыления должна быть соизмерима с толщиной покрытия.

Наиболее распространенным методом создания активации и придания нужной шероховатости напыляемой поверхности является струйно-абразивная обработка. Другие методы получения на поверхности шероховатости (нарезание рваной резьбы, электроискровая или электромеханическая обработка, анодно-механическое шлифование) могут заметно снижать усталостное сопротивление детали. Обработку поверхности проводят струей сжатого воздуха с абразивными частицами в защитных камерах. При толщине стенки детали или конструкции  $\leq 5 \text{ мм}$  необходимо применять специальные приспособления, исключающие ее коробление. Поверхности, не подлежащие струйно-абразивной обработке, защищают экранами из металла или абразивостойкого материала (например, резины). Зона обработки должна быть больше зоны напыления на  $2...3 \text{ мм}$  с каждой стороны.

Для струйно-абразивной обработки используют шлифзерно электрокорунда марок 12А – 15А по ТУ 2-036-197-76 зернистостью 63Н, 63П, 80Н, 80П по ГОСТ 3647-81. При нанесении коррозионно-стойких металлических покрытий рекомендуется применять высококремнистый абразив ДСК-17 с содержанием кремния в исходном материале 13...17 % фракции 0,8...1,6 мм. Металлическую дробь рекомендуется применять для обработки материалов с твердостью до 40 HRC. Не рекомендуется применять металлический абразив для подготовки поверхностей под напыление

жаро- и коррозионно-стойкими покрытиями, а также для деталей из меди и медных сплавов и других материалов с высокой вязкостью. После струйно-абразивной обработки детали обдувают сжатым воздухом для удаления с поверхности мелких частиц абразива. Не рекомендуется разрыв по времени между подготовкой поверхности и напылением  $> 3 \text{ ч}$ .

**Последующая обработка напыленных покрытий.** Поверхности с газотермическими покрытиями непосредственно после напыления не обладают требуемыми параметрами: точностью размеров, шероховатостью, плотностью структуры и т.д., в связи с чем их подвергают дополнительной обработке: резанием, оплавлением, припеканием, пропиткой и пр. Для упрочнения и снятия остаточных напряжений используют термическую обработку.

**Спекание.** Процесс ведут при общем нагреве напыленного изделия. Спекание проводится как в твердой фазе при температуре  $(0,8...0,9)T_{пл}$ , так и в присутствии жидкой фазы. Твердожидкое спекание в основном применяют для упрочнения композиционных покрытий. Образующаяся при расплавлении жидкая фаза проникает в несплошности покрытия, способствуя его упрочнению.

**Пропитка.** Для упрочнения газотермических покрытий применяют пропитку неорганическими материалами. Для этого на напыленную поверхность различными способами наносят пропиточный материал. При расплавлении благодаря капиллярным силам материал проникает в несплошности покрытия. Так, например, пропитку покрытий из карбида вольфрама осуществляют медью или припоями.

**Оплавление.** Это наиболее распространенный способ упрочнения покрытий. Процесс оплавления состоит в местном или общем нагреве напыленного изделия до температуры плавления материала покрытия. Для сохранения значительной части исходной тонкой структуры напыленного материала этот процесс ведут при температурах, близких к солидусу. Наиболее легко он реализуется в покрытиях, напыленных из самофлюсирующихся материалов. При этом самофлюсирующиеся элементы (бор и кремний) диффундируют в основной металл, что способствует повышению прочности сцепления напыленных покрытий до уровня, близкого прочности наплавочных слоев.

**Снятие остаточных напряжений.** В напыленных покрытиях практически всегда присутствуют остаточные напряжения растяжения.

При их критической величине покрытие отслаивается. С целью повышения работоспособности покрытий на практике наиболее часто снижают уровень остаточных растягивающих напряжений термообработкой. Обычно ее проводят при общем нагреве изделия до температуры 600...700 °C.

**Механическая обработка.** Большинство изделий с напыленными покрытиями подвергают окончательной механической обработке. При этом преследуют две цели: придания изделию окончательных размеров и доведения поверхности покрытия до требуемого класса чистоты. Основными методами механической обработки напыленных покрытий являются резание, шлифование и полировка. Для покрытий из металлических сплавов с повышенной твердостью обработка должна осуществляться на шлифовальных станках с алмазными кругами повышенной жесткости.

#### 15.4. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ

Для защиты от атмосферной коррозии в основном применяют цинк, алюминий и их сплавы, коррозионно-стойкие стали, а также титан. Повышенной коррозионной стойкостью обладает алюминиевый сплав, содержащий (в мас. %): 1...6 Zn, 0,01...0,05 In, 0,005...0,02 Cd. Этот сплав используют для металлизации стального листа. Алюминиевые покрытия более стойки, чем цинковые, на воздухе и в воде. Минимальная долговечность алюминиевых металлических газотермических покрытий толщиной 120...300 мкм составляет для среднеагрессивных сред 20...50 лет, для сильноагрессивных 12...35 лет. Покрытия, состоящие из оксида алюминия, хорошо защищают конструкции в азотной кислоте, 10...75%-ном растворе серной кислоты, 25...50%-ном растворе фосфорной кислоты, аммиаке, ацетоне, бензине, спиртах.

Антикоррозионные покрытия из цинка широко используют для защиты строительных конструкций, элементов плавучих доков, понтона и другого оборудования, эксплуатирующегося в морской и речной воде, загрязненной промышленными отходами. В условиях атмосферы цинковые покрытия толщиной до 300 мкм могут защищать металл от коррозии в течение нескольких десятилетий. При загрязненной атмосфере срок службы цинковых покрытий толщиной до 100 мкм 5...7 лет. Цинк

также устойчив к действию органических кислот.

Никелевые металлические покрытия на сталях, сплавах меди, цинка, алюминия применяют в качестве противокоррозионных покрытий для конструкций, подверженных воздействию атмосферной и морской коррозии, коррозии в пресных водах. Скорость атмосферной коррозии никелевого покрытия 0,02...0,2 мм/год. Никелевые покрытия растворяются в присутствии аммиака, его коррозия усиливается при содержании хлоридов железа, меди, ртути. Никелевые покрытия нестойки в азотной кислоте.

Покрытия из тугоплавких металлов, многослойные и комбинированные покрытия применяются для защиты изделий от особо агрессивных условий эксплуатации: высокотемпературной коррозии в присутствии растворов солей и расплавов солей и металлов, высокотемпературной коррозии в присутствии сернистых газов, углеводородных соединений, хлоридов.

#### 15.5. ТЕПЛО- И ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ

В качестве тепло- и жаростойких покрытий применяют тугоплавкие оксиды, интерметаллиды, жаропрочные сплавы и стали, многие из которых находят применение и как износостойкие покрытия. Помимо этих материалов для получения жаростойких покрытий перспективны многие тугоплавкие карбиды различных металлов, соединения бора и керметы. В последние десятилетия начали также использовать металлокерамические термозащитные покрытия, защищающие одновременно от окисления и нагрева. Тепло- и жаростойкие покрытия в основном предназначены для защиты деталей, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах, от высокотемпературной газовой коррозии.

Покрытия на основе алюминидов никеля, кобальта, железа широко применяются для защиты деталей, например лопаток газовых турбин, от высокотемпературного окисления. Хорошие защитные свойства этих покрытий определяются прежде всего формированием на их поверхности при окислении плотной оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , препятствующей дальнейшему окислению.

Широко распространены диффузионные алюминидные покрытия на жаропрочных никелевых сплавах, которые получают насыща-

нием из порошковых смесей с галогенидными активаторами.

Новые возможности для формирования жаростойких покрытий предоставляют такие способы, как электронно-лучевое испарение, плазменное напыление, в том числе напыление в динамическом вакууме, ионно-плазменное распыление и др. Эти способы используются для нанесения покрытий типа MeCrAlY (Me – Ni, Co, Fe), причем их толщина может быть >100 мкм. Сплавы системы Me – Cr – Al являются основой покрытия, а иттрий вводится в небольших количествах (обычно <1 %) для повышения адгезионной прочности оксидной пленки, формирующейся при окислении. Покрытия системы NiCrAlY используют обычно для защиты деталей газотурбинного двигателя от окисления при высоких температурах (>900 °C). Покрытия системы CoCrAlY применяют для защиты деталей стационарных или морских газовых турбин от коррозии при средних температурах (700...900 °C). Покрытия системы FeCrAlY перспективны для защиты деталей от газовой коррозии при температурах <700 °C. Покрытия MeCrAlY обычно содержат 6...12 % Al и 20...30 % Cr.

Наиболее подходят для выбора материалов жаростойких покрытий жаропрочных сплавов, работающих в окислительных газовых средах в температурном интервале 1200...1700 °C, силицидные системы. Главным их достоинством является образование при высокотемпературном окислении сплошной «самозалечивающейся» стекловидной окалины SiO<sub>2</sub>, малопроницаемой для кислорода. Покрытия этой системы используют в основном для защиты сплавов на основе тугоплавких металлов (особенно на основе ниобия, молибдена) и углеродных материалов (углеграфитовые и углерод-углеродные композиционные материалы). В многокомпонентных силицидных покрытиях основным слоем, определяющим формирование защитной окалины, наиболее часто является либо легированный дисилиций молибдена, либо твердые растворы тугоплавких дисилицидов, модифицированные для улучшения защитных, технологических и эксплуатационных свойств бором, иттрием, переходными металлами IV – VII групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

В последнее время начали применяться так называемые термозащитные покрытия. Они представляют собой композиционные металлокерамические покрытия с керамическим слоем

(или слоями), обладающим низкой теплопроводностью. Термозащитные покрытия наносят на различные детали тепловых машин: клапаны, поршень, головку цилиндра дизельных двигателей, рабочие и сопловые лопатки и детали камеры сгорания газовых турбин и др. Наиболее часто используют двухслойные покрытия: внешний слой из керамики (обычно ZrO<sub>2</sub> – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), внутренний металлический, чаще всего из сплава типа MeCrAlY. Такие термозащитные покрытия наносят на детали из жаропрочных сплавов на основе никеля, кобальта, железа. Как правило, для термозащитных покрытий идет керамика на основе ZrO<sub>2</sub>. Однако это покрытие имеет низкую термостойкость. Поэтому для термозащитных покрытий главным образом используют ZrO<sub>2</sub> с добавкой 6...8 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Стабилизаторами кроме Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> служат также MgO, CeO<sub>2</sub>, CaO и другие соединения. Выбор стабилизатора в значительной мере определяется условиями эксплуатации конкретной детали. Для работы при температурах >1000 °C рекомендуется керамика ZrO<sub>2</sub> – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 15.6. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ

В качестве износостойких покрытий находят применение углеродистые легированные стали, сплавы на основе никеля и кобальта и твердые сплавы.

Особый интерес представляют сплавы на никелевой основе самофлюсирующегося типа с боридным и карбоборидным упрочнением системы Ni – Cr – Si – B. В зарубежной практике они известны как сплавы колмона и аллюй. Главное назначение самофлюсирующихся сплавов – получение износостойких покрытий. В связи с этим часто используют композиционные порошки на основе самофлюсирующихся сплавов. В качестве второго компонента добавляют карбиды, бориды (WC, TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, CrB и др.) или чистые металлы (алюминий, титан и др.). При расплавлении металлов взаимодействует с никелем, образуя никелиды, например NiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, TiNi, TiAl<sub>3</sub> и др. В табл. 15.1 представлен химический состав гранулированных порошков системы Ni – Cr – Si – B, выпускаемых в России и нашедших наиболее широкое применение для напыления и наплавки различными способами.

Порошки типа BCНГН представляют собой композиционную смесь порошков СНГН и карбида вольфрама (WC, W<sub>2</sub>C).

**15.1. Химический состав отечественных гранулированных порошков системы  
Ni – Cr – Si – В (основа – никель)**

Марка сплава	Массовая доля элементов, %					Твердость, HRC
	Cr	В	Si	C	Fe	
ПГ-СР2	12...15	1,5...2,1	2,0...3,0	0,2...0,5		38...43
ПГ-СР3	13...16	2,0...2,8	2,5...3,5	0,4...0,7	5,0	47...52
ПГ-СР4	13...18	2,8...3,8	3,0...4,5	0,6...1,0		57...62
СНГН-50	13...15	2,7...3,2	3,0...3,7	0,5...0,7		47...53
СНГН-55	14...17	3,2...4,0	3,5...4,5	0,7...1,0	3,0	53...57
СНГН-60	16...19	4,0...4,7	4,0...5,0	0,9...1,1		58...62
ВСНГН-35	12...20	2,0...4,7	3,0...5,0	0,5...1,2	3,5	
ВСНГН-70	17	2,5	4,0	1,0	4,0	—

Содержание бора и кремния в хромоникелевых сплавах ограничено несколькими процентами (концентрация их изменяется от 1,5 до 4,5 %), поскольку увеличение содержания этих компонентов заметно снижает пластические свойства сплавов. Такого содержания бора и кремния, однако, достаточно, чтобы значительно понизить температуру плавления сплавов. Структура покрытия сложна и обычно состоит из твердого раствора на основе никеля, многокомпонентной эвтектики боридов, карбидов и силицидов. Износостойкость покрытий в значительной степени определяется характером микроструктуры. Твердость хромоникелевых сплавов зависит главным образом от содержания углерода и бора и колеблется от 38...43 HRC для сплавов типа ПГ-СР2 до 57...73 HRC для сплавов типа ПГ-СР4. Горячая твердость некоторых никелевых сплавов до температур 530...580 °C не уступает кобальтовым сплавам типов В2К и В3К. Однако при более высоких температурах горячая твердость и жаростойкость никелевых сплавов несколько ниже, чем стеллитов.

Большинство из этих сплавов имеет температуру плавления твердого раствора (Ni – Cr) в интервале 1050...1150 °C, а сплавы с высоким содержанием бора и кремния – в интервале 970...1070 °C. Все сплавы системы Ni – Cr – Si – В многоцелевые и могут быть рекомендованы для сложных форм изнашивания, сочетающих многообразие таких факторов, как абразивное воздействие, эрозия, кави-

тация, высокотемпературные разгарные трещины, давление при высоких температурах и т.д. Хромоникелевые сплавы с бором и кремнием типов СНГН, ВСНГН, ПГ-СР рекомендуются для:

- деталей уплотнительной и запорной арматуры;
- лопастей смесителей, мешалок и вентиляторов;
- уплотнительных клапанов, колец, обойм подшипников, элементов пресс-форм, шеек валов, калибров, ножей центрифуг и других деталей химического, энергетического, транспортного и metallurgического оборудования.

Для узлов и деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания (газовая и паровая эрозия при высоких температурах, трение без смазки и т.п.), применяют напыление на рабочие поверхности твердыми сплавами типа стеллит.

Стеллиты представляют собой пластичную матрицу с включениями в нее карбидов, что позволяет этим материалам хорошо сопротивляться коррозии в самых различных средах и сохранять эти свойства до температур ~800 °C. Характерные черты стеллитов – хорошая обрабатываемость практически всеми видами механической обработки и возможность получения поверхности высокой чистоты. В отечественной промышленности широкое распространение получили стеллиты на кобальтовой основе (табл. 15.2).

### 15.2. Химический состав сплавов типа стеллита

Марка сплава	Массовая доля элементов, %							
	W	Cr	Co	Ni	Fe	Si	Mn	C
B2K	13...17	27...33	47...53	<2	<2	1,0...2,0	<1	1,8...2,5
B3K	4...5	28...32	58...62			2,4...2,5	—	1,0...1,5
3B16K	15...16	21...25	52...61	—	<1,0	0,7...1,1	2,0...2,5	2,5...3,0

### 15.3. Химический состав сплавов типа сормайта

Марка сплава	Массовая доля элементов, %							Твердость, HRC
	Fe	C	Cr	Si	Mn	Ni	прочих	
ПГ-С1	Основа	2,5...3,5	25...31	2,8...4,2	1,5...1,6	3,5	—	46...52
ПГ-С2		1,5...2,0	13...17	1,5...2,2	0,4...1,0	1,5...2,5		46...55
ПГ-С27		3,3...4,5	23...28	1,0...2,0	0,8...1,5	1,5...2,0	0,1...0,2 Mo	50...56

Сплавы на основе железа – это высокоуглеродистые, высокохромистые заэвтектические сплавы, обладающие высокой износстойкостью при истирании в абразивной среде. Температура плавления этих сплавов 1280...1360 °C. Сплавы на основе железа типа сормайт (табл. 15.3) широко используются для напыления деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Структура напыленного сормайта состоит в основном из вязкой аустенитной матрицы, обеспечивающей надежное закрепление карбидной фазы. Твердая фаза представляет собой эвтектику ледебуритного типа, содержащую вместо цементита комплексный кубический карбид (Fe, Cr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Износстойкость сплава сильно зависит от его структуры, количества твердых частиц и степени карбидной неоднородности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
- Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
- Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко и др. Киев: Наукова думка, 1987. 543 с.
- Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
- Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии / А.П. Семенов, И.Б. Ковш, И.М. Петрова и др. М.: Наука, 1992. 404 с.
- Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марчиков Г.В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 96 с.
- Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. М.: Металлургия, 1992. 112 с.
- Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 496 с.
- Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2-х т. Т. 1. М.: «Л.В.М. – Скриптор», Машиностроение, 1995. 832 с.
- Сварка и сварочные материалы. В 3-х т. Т. 2. Технология и оборудование: Справ. изд. / Под ред. В.М. Ямпольского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 574 с.
- Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
- Хокинг М., Васантаари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Пер. с англ. М.: Мир, 2000. 518 с.
- Ягодкин Ю.Д., Терентьев В.С. Жаростойкие покрытия // Итоги науки техники. Сер. «Металловедение и термическая обработка». 1991. Т. 25. М.: ВИНИТИ. С. 182 – 253.

## Глава 16

# НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 16.1. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При производстве сварных деталей и конструкций образуются дефекты различного вида, которые условно можно классифицировать на:

- дефекты подготовки и сборки;
- дефекты формы шва;
- наружные и внутренние дефекты.

**Дефекты подготовки и сборки.** Характерными видами дефектов при сварке плавлением являются: неправильный угол скоса кромок шва с V-, X- и U-образной разделкой; слишком большое или малое притупление по длине стыкуемых кромок; непостоянство зазора между кромками по длине стыкуемых элементов; несовпадение стыкуемых плоскостей; слишком большой зазор между кромками свариваемых деталей; расслоения и загрязнения кромок.

Указанные дефекты могут возникнуть из-за: неисправности станочного оборудования, на котором обрабатывали заготовки; недоброкачественности исходных материалов; ошибок в чертежах; низкой квалификации слесарей и сборщиков.

**Дефекты формы шва.** Форма и размеры сварных швов обычно задаются техническими условиями, указываются на чертежах и регламентируются стандартами. Конструктивными элементами стыковых швов (рис. 16.1) являются их ширина  $e$ , высота выпуклости  $q$  и подварки  $q_1$ ; угловых швов тавровых и нахлесточных соединений без скоса кромок (рис. 16.2) – катет  $K$  и толщина  $a$ . Размеры швов зависят от толщины  $s$  свариваемого металла и условий эксплуатации конструкций.

При выполнении сварных соединений любыми методами сварки плавлением швы могут иметь неравномерную ширину и высоту, бугры, седловины, неравномерную высоту катетов в угловых швах (рис. 16.3).

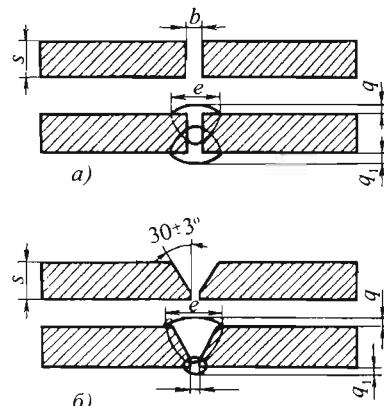


Рис. 16.1. Основные конструктивные элементы сварных швов:

а – без подготовки кромок малых толщин  
б – с V-образной разделкой

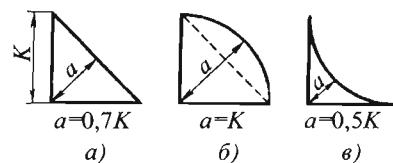


Рис. 16.2. Основные конструктивные элементы валиков:

а – нормального; б – выпуклого; в – вогнутого

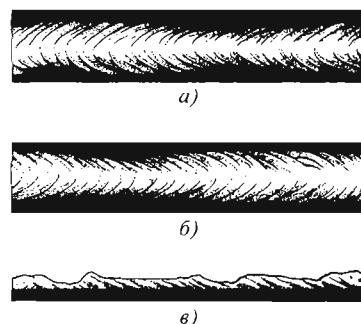


Рис. 16.3. Дефекты формы швов:

а – неравномерная ширина шва при ручной сварке;  
б – то же, при автоматической сварке;  
в – неравномерная выпуклость – бугры и седловины

**Неравномерная ширина швов** образуется при неправильном движении электрода, зависящем от зрительно-двигательной координации (ЗДК) сварщика, а также в результате возникших отклонений от заданного зазора кромок при сборке. При автоматической сварке причиной образования этого дефекта является нарушение скорости подачи проволоки, скорости сварки и т.д.

**Неравномерность выпуклости** по длине шва, **местные бугры и седловины** получаются при ручной сварке из-за недостаточной квалификации сварщика и в первую очередь объясняются особенностями ЗДК сварщика; неправильными приемами заварки прихваток; неудовлетворительным качеством электродов.

При автоматической сварке эти дефекты встречаются редко и являются следствием неполадок в механизме автомата, регулирующем скорость сварки.

Перечисленные дефекты формы шва снижают прочность соединения и косвенно указывают на возможность образования внутренних дефектов.

**Наружные дефекты.** К ним относят наплыты, подрезы, незаделанные кратеры, прожоги.

**Наплыты** образуются в результате стекания расплавленного металла электрода на нерасплавленный основной металл или ранее выполненный валик без сплавления с ним (рис. 16.4). Наплыты могут быть местными, в виде отдельных зон, а также значительными по длине.

Наплыты возникают из-за: чрезмерной силы тока при длинной дуге и большой скорости сварки; неудобного пространственного положения (вертикальное, потолочное); увеличенного наклона плоскости, на которую накладывают сварной шов; неправильного ведения электрода или неверного смещения электродной проволоки при сварке кольцевых швов под флюсом; выполнения вертикальных швов вверх и недостаточного опыта сварщика.

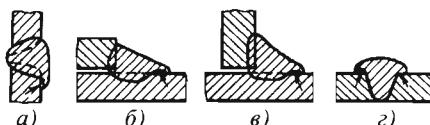


Рис. 16.4. Наплыты в швах:

- а – горизонтальном;
- б – нахлесточного соединения;
- в – таврового соединения;
- г –стыкового соединения или при наплавке валиков

**Подрезы** представляют собой углубления (канавки) в основном металле, идущие по краям шва (рис. 16.5). Глубина подреза может колебаться от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Причинами образования этого дефекта являются: значительной силы ток и повышенное напряжение дуги; неудобное пространственное положение при сварке; небрежность сварщика.

Подрезы в шве уменьшают рабочую толщину металла, вызывают местную концентрацию напряжений от рабочих нагрузок и могут быть причиной разрушения швов в процессе эксплуатации. Подрезы в стыковых и угловых швах, расположенные поперек действующих на них сил, приводят к резкому снижению вибрационной прочности; даже достаточно крупные подрезы, проходящие вдоль действующей силы, отражаются на прочности в значительно меньшей степени, чем подрезы, расположенные поперек.

**Кратер** – углубление, образующееся в конце шва при внезапном прекращении сварки. Особенно часто кратеры возникают при выполнении коротких швов. Размеры кратера зависят от величины сварочного тока. При ручной сварке его диаметр колеблется от 3 до 20 мм, при автоматической он имеет удлиненную форму в виде канавки. Незаделанные кратеры снижают прочность сварного соединения, так как концентрируют напряжения. При вибрационной нагрузке снижение прочности соединения из малоуглеродистой стали достигает 25 %, а из низколегированных – 50 % при наличии в шве кратера.

**Прожоги** – дефекты в виде сквозного отверстия в сварном шве, образующиеся при вытекании сварочной ванны; сварке металла небольшой толщины и корня шва в многослойных швах, а также при сварке снизу вверх вертикальных швов (рис. 16.6). Причинами прожогов являются: чрезмерно высокая погонная

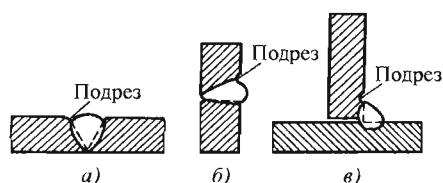


Рис. 16.5. Подрезы:

- а – в стыковом шве;
- б – в горизонтальном шве, расположенным на вертикальной плоскости;
- в – в угловом шве таврового соединения

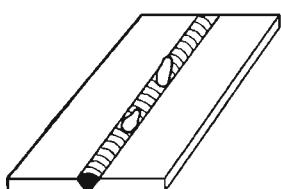


Рис. 16.6. Прожоги

энергия дуги, неравномерная скорость сварки, остановка источника питания, увеличенный зазор между кромками свариваемых элементов. Во всех случаях отверстие, возникающее при прожогах, хотя и заделывается, однако шов в этом месте получается неудовлетворительный по внешнему виду и качеству.

**Поджоги** возникают в результате возбуждения дуги («чирканья электродом») на краю кромки. Этот дефект служит источником концентрации напряжений, его обязательно удаляют механическим способом.

**Внутренние дефекты.** К ним относят поры, шлаковые включения, непровары, несплавления и трещины.

**Поры** (рис. 16.7) в виде полости окружной формы, заполненной газом, образуются вследствие: загрязненности кромок свариваемого металла, использования влажного флюса или отсыревших электродов, недостаточной защиты шва при сварке в углекислом газе, увеличенной скорости и завышенной длины дуги. При сварке в углекислом газе, а в некоторых случаях и под флюсом на больших токах, образуются сквозные поры – так называемые *свищи*.

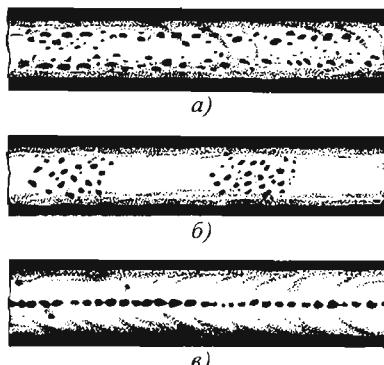


Рис. 16.7. Характер пористости в наплавленном

металле шва:

- а – равномерная пористость;
- б – скопления пор;
- в – цепочки пор

Размеры внутренних пор колеблются от 0,1 до 2...3 мм в диаметре, а иногда и более. Поры, выходящие на поверхность шва, могут быть и больше. Свищи при сварке под флюсом и в углекислом газе на больших токах могут иметь диаметр до 6...8 мм. Длина так называемых «червеобразных» пор – до нескольких сантиметров.

Равномерная пористость (см. рис. 16.7, а) обычно возникает при постоянно действующих факторах: загрязненности основного металла по свариваемым поверхностям (ржавчина, масло и т.п.), непостоянной толщине покрытия электрода и т.д. Скопление пор (см. рис. 16.7, б) наблюдается при местных загрязнениях или отклонениях от установленного режима сварки, а также при нарушении сплошности покрытия электрода, сварке в начале шва, обрыве дуги или случайных изменениях ее длины.

Цепочки пор (см. рис. 16.7, в) образуются в условиях, когда газообразные продукты проникают в металл по оси шва на всем его протяжении (при сварке по ржавчине, подсоечке воздуха через зазор между кромками, подварке корня шва некачественными электродами). Одиночные поры возникают за счет действия случайных факторов (колебания напряжения в сети и т.д.). Наиболее вероятно возникновение пор при сварке алюминиевых и титановых сплавов, в меньшей степени – при сварке сталей.

**Шлаковые включения** в металле сварного шва – это небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, оксидами). Вероятность образования шлаковых включений в значительной мере определяется маркой сварочного электрода. При сварке электродами с тонким покрытием вероятность образования шлаковых включений очень велика. При сварке высококачественными электродами, дающими много шлака, расплавленный металл дольше находится в жидком состоянии и неметаллические включения успевают всплыть на его поверхность, в результате чего шов засоряется шлаковыми включениями незначительно.

Шлаковые включения можно разделить на макро- и микроскопические. Макроскопические включения имеют сферическую и продолговатую форму в виде вытянутых «хвостов». Эти включения образуются в шве из-за плохой очистки свариваемых кромок от окалины и других загрязнений и чаще всего вследствие внутренних подрезов и плохой зачистки от шлака поверхности первых слоев многослойных швов перед заваркой последующих (рис. 16.8).

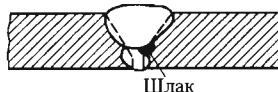


Рис. 16.8. Шлаковые включения по подрезу кромки в многослойном шве

Микроскопические шлаковые включения появляются в результате образования в процессе плавления некоторых химических соединений, остающихся в шве при кристаллизации.

**Оксидные пленки** могут возникать при всех видах сварки. Причины их образования такие же, как и шлаковых включений: загрязненность поверхностей свариваемых элементов; плохая зачистка от шлака поверхности слоев шва при многослойной сварке; низкое качество электродного покрытия или флюса; недостаточно хорошая квалификация сварщика и т.п.

**Непровары** – это дефект в виде местного несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков. Непровары (рис. 16.9, а) в виде несплавления основного металла с наплавленным представляют собой тонкую прослойку оксидов, а в некоторых случаях – грубую шлаковую прослойку между основным и наплавленным металлом. Причинами образования таких непроваров являются:

- плохая зачистка кромок свариваемых деталей от окалины, ржавчины, краски, шлака, масла и других загрязнений;
- блуждание или отклонение дуги под влиянием магнитных полей, особенно при сварке на постоянном токе;
- электроды из легкоплавкого материала (при выполнении шва такими электродами жидкий металл натекает на неоплавленные свариваемые кромки);
- чрезмерная скорость сварки, при которой свариваемые кромки не успевают расплавиться;
- значительное смещение электрода в сторону одной из свариваемых кромок, при этом расплавленный металл натекает на вторую нерасплавленную кромку, прикрывая непровар;
- неудовлетворительное качество основного металла, сварочной проволоки, электродов, флюсов и т.д.;
- плохая работа сварочного оборудования – колебания силы сварочного тока и напряжения дуги в процессе сварки;
- низкая квалификация сварщика.

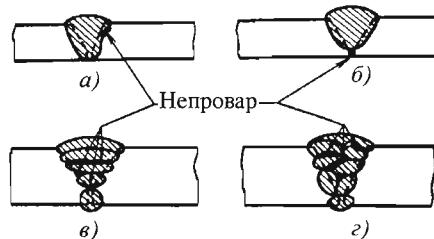


Рис. 16.9. Непровары:

- а – по кромке с основным металлом; б – в корне шва; в – между отдельными слоями; г – между валиками

Причинами образования непроваров в корне шва (см. рис. 16.9, б) кроме указанных выше могут быть: недостаточный угол скоса кромок; большая величина их притупления; маленький зазор между кромками свариваемых деталей; большое сечение электрода или присадочной проволоки, укладываемой в разделку шва, что значительно затрудняет расплавление основного металла. Непровары между отдельными слоями (см. рис. 16.9, в, г) возникают по следующим причинам: из-за не полностью удаленного шлака, образовавшегося при наложении предыдущего валика, что возможно из-за трудности его удаления или небрежности сварщика; недостаточной тепловой мощности (малый ток, излишне длинная или короткая дуга).

**Трецины** – частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва (рис. 16.10). Образованию трещин способствуют следующие факторы:

- сварка легированных сталей в жестко закрепленных конструкциях;
- высокая скорость охлаждения при сварке углеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе;
- применение высокоуглеродистой электродной проволоки при автоматической сварке конструкционной легированной стали;

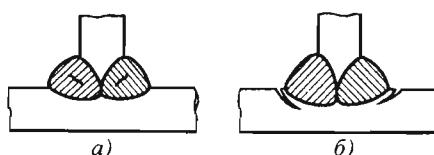


Рис. 16.10. Трецины в сварных швах и соединениях:

- а – в наплавленном металле;  
б – в зонах сплавления и термического влияния

- использование повышенных плотностей сварочного тока при наложении первого слоя многослойного шва толстостенных сосудов и изделий;
- недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке;
- слишком глубокие и узкие швы при автоматической сварке под флюсом;
- выполнение сварочных работ при низкой температуре;
- чрезмерное нагромождение швов для усиления конструкции (применение накладок и т.п.), в результате чего возрастают сварочные напряжения, способствующие образованию трещин в сварном соединении;
- наличие в сварных соединениях других дефектов, являющихся концентраторами напряжений, под действием которых в области дефектов начинают развиваться трещины.

Существенным фактором, влияющим на образование *горячих трещин* (ГТ), является засоренность основного и присадочного металлов вредными примесями серы и фосфора. *Холодные трещины* (ХТ) образуются при наличии составляющих мартенситного и бейнитного типов, концентрации диффузного водорода в зоне зарождения трещин и растягивающих напряжений I рода. Трещины относятся к наиболее опасным дефектам и по всем действующим нормативно-техническим документам (НТД) недопустимы.

Для электронно-лучевой (ЭЛС) и лазерной сварки (ЛС) наиболее характерны: *несплавления за счет смещения луча* вследствие намагничивания (ЭЛС) или непостоянства

зазора по длине (ЛС); газовые полости, возникающие из-за неполного закрытия газодинамического канала; дефекты формирования шва из-за выброса металла; пористость.

**Металлические включения.** В практике наиболее распространены вольфрамовые включения при сварке алюминиевых сплавов (рис. 16.11). Они обычно возникают при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом. При этом могут наблюдаться мгновенная нестабильность дуги и появление одновременно с вольфрамовыми включениями оксидных включений. Вольфрамовые включения могут располагаться внутри шва и на поверхности соединений в виде брызг. При попадании вольфрама в жидкую ванну он обычно погружается на дно ванны. Вольфрам в алюминии нерастворим и обладает большой плотностью. На рентгеновском снимке он дает характерные ясные изображения произвольной формы (см. рис. 16.11). Вольфрамовые включения, как правило, обраются в местах обрыва дуги, при этом вольфрам скапливается в вершине кратеров, где часто образуются трещины.

Вольфрамовые включения подразделяют на две основные группы: изолированные и групповые. Размер диаметра изолированных включений 0,4...3,2 мм. Групповые включения описываются (по рентгенограмме) размером группы, количеством и размером отдельных (изолированных) включений в группе, при этом размер группы характеризуется размером минимальной окружности, в которую вписывается группа включений. Если изображение нескольких включений сливаются, то их принимают за одно включение.

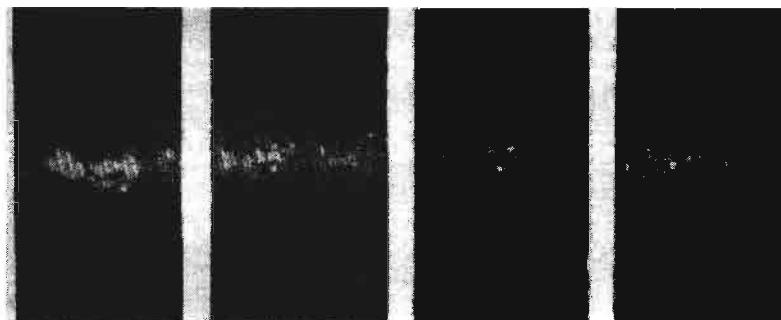


Рис. 16.11. Вольфрамовые включения в швах сварных соединений алюминиевого сплава (рентгеновский снимок)

### 16.1.1. ДЕФЕКТЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Основными наружными дефектами швов сварных соединений, выполненных точечной сваркой, являются:

- наружные трещины (рис. 16.12);
- прожог;
- наружный выплеск;
- вырыв точек;
- выход на поверхность литой структуры;
- разрыв металла у кромки соединения;
- поверхностное нарушение сплошности металла во вмятине от электрода;
- чрезмерная вмятина и неправильная форма вмятины от электрода;
- темная поверхность сварных точек.

Образованию этих дефектов способствуют:

- большая величина или длительность импульса сварочного тока;
- малое усилие сжатия электрода или отсутствие его;
- плохая подготовка поверхностей свариваемых деталей;
- загрязнение электродов;
- малое ковочное усилие;
- позднее приложение последнего;
- недостаточное охлаждение электрода;
- неисправное сварочное оборудование;
- неправильная форма контактных поверхностей электрода;
- большие натяги деталей при сварке и в процессе правки;
- неверное установление электрода и т.д.;
- близость сварной точки к краю соединения;
- малая величина нахлестки и др.;
- небольшой размер рабочей поверхности электрода;
- перекос деталей или электрода;

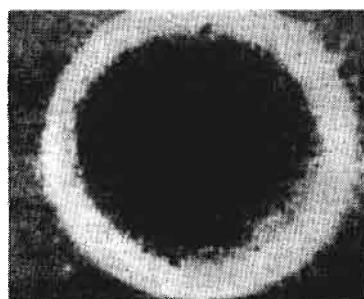


Рис. 16.12. Наружные трещины сварной точки.  
Увеличение 10<sup>х</sup>

- неправильная заточка или неравномерный износ рабочей поверхности электрода;
- перекос свариваемых электрода конструкции.

Основные внутренние дефекты точечной сварки:

- непровар (рис. 16.13) – отсутствие взаимнойлитой зоны соединяемых элементов сварной конструкции;
- внутренние трещины, поры и раковины;
- внутренний выплеск металла (рис. 16.14);
- несимметричное расположение ядра точки;
- чрезмерное проплавление – проплавление >80 % толщины свариваемого листа.

Причины образования внутренних дефектов:

- недостаточная величина или импульс сварочного тока;
- большое усилие сжатия электрода;
- шунтирование сварочного тока;
- увеличение рабочей поверхности электрода;
- нестабильность контактного сопротивления, вызванная плохой подготовкой поверхностей деталей;
- большой плакирующий слой;
- раннее приложение ковочного усилия;
- малое усилие сжатия электрода;
- малое ковочное усилие;
- запаздывание включения ковочного усилия;
- большой сварочный ток;
- продолжительное время сварки;

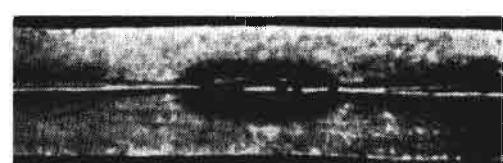


Рис. 16.13. Макроструктура непроваренной сварной точки из сплава Д16Т толщиной 2 + 2 мм.  
Увеличение 5<sup>х</sup>



Рис. 16.14. Сварные точки с выплеском

– большое контактное сопротивление деталей;

- плохая зачистка электродов;
- большая величина сварочного тока или его импульса;
- плохая подготовка поверхностей деталей;
- загрязнение электродов;
- малое усилие сжатия электродов;
- перекос свариваемых элементов конструкции;
- смещение сварной точки к краю нахлестки;
- малая нахлестка;
- неправильный подбор размеров контактных поверхностей электродов;
- сварка различных по химическому составу материалов;
- сварка деталей разной толщины и др.

Основным дефектом контактнойстыковой сварки сопротивлением или оплавлением является «слипание», при котором между свариваемыми элементами имеется механический контакт, но отсутствует взаимное прорастание зерен между соединяемыми границами. Подобный дефект часто образуется при сварке трением, давлением, диффузионной и сварке взрывом. Уверенно обнаружить слипание известными физическими методами контроля достаточно сложно. Для предупреждения его образования применяют так называемые параметрические методы контроля, при которых ряд доминирующих параметров (ток, напряжение, давление, длительность, скорость осадки и т.д.) поддерживается в определенных заранее установленных границах.

#### 16.1.2. ДЕФЕКТЫ КЛЕЕНЫХ И КЛЕЕСВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Характерные дефекты клееных соединений:

- трещины и расслоения;
- непроклей (зона отсутствия сцепления между соединяемыми элементами);
- пониженная адгезия клея со склеиваемой поверхностью;
- пористость;
- пузыри и раковины;
- пережог и др.

Основные причины образования этих дефектов:

- неправильный режим полимеризации;
- слишком высокое давление;
- излишнее количество клея;

– вытекание клея в процессе термообработки;

- недостаточное количество клея, нанесенного на кромки;
- пониженная вязкость клея;
- попадание пузырьков воздуха при нанесении клея и др.;
- недоброкачественный клей;
- плохая подготовка поверхности под склеивание;
- некачественная сборка и прихватка склеиваемых элементов конструкции;
- недостаточное давление;
- большие зазоры при соединении плохо пригнанных заготовок;
- наличие в клеевом слое растворителя;
- чрезмерное разбавление клея (уменьший процент сухого остатка);
- неправильный режим полимеризации клея и др.

Клеесварные соединения получают в процессе совмещения технологических процессов точечной сварки и склеивания металлов. Наибольшее распространение в машиностроении получили kleesварные соединения из алюминиевых сплавов типа Д16, АМг6 и др. В готовом kleesварном соединении встречаются дефекты, свойственные точечной сварке и склеиванию. Наиболее опасным дефектом следует считать дефект точечной сварки – непровар.

#### 16.1.3. ДЕФЕКТЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При изготовлении паяных изделий (конструкций) образующиеся дефекты можно разделить на три группы:

- дефекты заготовок и сборки изделия под пайку;
- дефекты паяных швов;
- дефекты готового паяного изделия.

Для обеспечения качества паяной конструкции в первую очередь необходимо обеспечить качество изготовления заготовок и сборки под пайку. При сборке обращают внимание на установление необходимых зазоров и надежное закрепление соединяемых элементов изделия. Изделие, подлежащее пайке, после нанесения и закрепления припоя устанавливают в приспособление, обеспечивающее полное затекание припоя в зазоры и наименьшее коробление конструкции.

Характерные дефекты сборки под пайку: неравномерность зазора между соединяемыми

поверхностями; смещение элементов паяемого изделия. Эти дефекты возникают вследствие неточной обработки заготовок; смещения заготовок в процессе их закрепления при сборке; отсутствия приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию изделия и отдельных его элементов.

Типичные дефекты паяных швов (соединений): непропай – несплошное заполнение зазора припоем, а также отсутствие связи между припоем и основным металлом; трещины; поры и раковины; шлаковые и флюсовые включения.

Непропай возникает в результате несмачивания паяемого металла припоем. Чтобы избежать непропаянных мест, необходимо тщательно удалить оксидную пленку и обеспечить установленные технологией пайки зазоры. Наличие вредных примесей в припоях отрицательно влияет на качество заполнения зазора. Жидкотекучесть припоеv резко снижается при их загрязнении оксидами.

Трещины в паяных швах могут возникнуть под действием собственных напряжений в основном металле или вследствие вибраций паяемой конструкции в процессе пайки, когда закристаллизовавшийся припой недостаточно прочен. К образованию трещин склонны швы, спаянные припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации.

Различают ГТ и ХТ. Первые образуются в процессе кристаллизации и усадки припоя при высоких температурах, вторые – при температурах до 200 °C.

В зависимости от расположения трещины делят на три группы:

- в шве паяного соединения;
- в основном металле;
- в контакте припоя с основным металлом.

Трещины в припое паяного шва могут возникнуть вследствие усадки при кристаллизации и образования галтелей в соединениях, паянных внахлестку. Трещины в контакте припой – основной металл могут появиться при пайке разнородных металлов с резко различными физико-химическими свойствами. Наиболее часто этот дефект наблюдается при пайке пластин твердых сплавов к корпусам инструментов из конструкционных сталей. Трещины могут также возникнуть при пайке медными и серебряными припоями коррозионностойких сталей в напряженном состоянии.

В основном металле ГТ и ХТ появляются под действием собственных напряжений,

имеющих место при сборке, нагреве под пайку, кристаллизации металла шва и охлаждении паяного соединения. В основном металле трещины могут образовываться под действием расплавленного припоя. Их появлению может способствовать проникновение припоя по границам зерен основного металла, что ослабляет связи между ними. При наличии собственных напряжений или внешней нагрузки это приводит к образованию трещин.

Возникновение мелких пор, в том числе и непропаев, может вызвать выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и образующихся при испарении отдельных компонентов флюсов и припоеv. Усадочные раковины, поры и неспай могут появиться также при недостаточном количестве внесенного при пайке припоя или слишком большом зазоре между кромками свариваемых деталей. Наличие адсорбированного слоя влаги во флюсе и на прутках припоя тоже способствует появлению пор и непропаев.

Шлаковые включения в паяном шве образуются вследствие плохой подготовки поверхности соединяемых элементов перед пайкой, наличия загрязнений (ржавчины, масла и т.д.), а также при длительном нагреве во время пайки, когда флюс, реагируя с основным металлом, переходит в шлак, плохо вытесняемый припоеv. Избыток кислорода в пламени при пайке газовой горелкой также влечет за собой образование шлаковых включений.

К дефектам готового паяного изделия относятся деформации и коробление, вызванные неравномерными нагревом и охлаждением в процессе пайки, а также неправильной сборкой изделия под пайку.

Анализируя дефекты сварки, пайки, склейивания и причины их возникновения, можно утверждать, что для предотвращения образования дефектов в первую очередь необходимы строгое соблюдение технологии сварки, пайки, склейивания и надежный контроль качества в процессе производства.

## 16.2. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ И СПОСОБЫ ИХ ИСПРАВЛЕНИЯ

Современное машиностроение предъявляет весьма высокие требования к качеству изготавляемых изделий и прежде всего к их прочности, понимаемой в широком смысле как сопротивление деформированию и разруше-

нию. Эти требования обусловлены все возрастающей напряженностью условий работы деталей машин. При расчете деталей на прочность исходили из модели сплошного твердого тела, обладающего совершенной структурой, а для изготовления их рассчитывали использовать простые по составу материалы (например, углеродистые и низколегированные стали), отличающиеся высокой технологичностью.

В современных же агрегатах значительная часть деталей подвергается длительным статическим нагрузкам при повышенных температурах или повторным нагрузкам (в том числе и знакопеременным) при нормальных и повышенных температурах или же работает в условиях воздействия на них агрессивных сред, резких тепловых ударов или радиоактивного излучения. Для изготовления таких деталей требуются высокопрочные, жаропрочные, кислотоупорные металлические и неметаллические материалы: стали, сплавы, пластические массы, обладающие повышенными специальными свойствами (пределом прочности, длительной прочностью, пределом ползучести, пределом выносливости, сопротивлением термической усталости, коррозионной стойкостью и т.д.).

Стали и сплавы, удовлетворяющие этим требованиям, как правило, отличаются сложным составом и характеризуются более низкими технологическими свойствами, что весьма затрудняет изготовление из них изделий, а в ряде случаев приводит к необходимости создания новых технологических процессов для придания им необходимых формы и свойств.

Требование сочетать указанные выше свойства с малой массой изделия обусловило применение составных конструкций, например из металлических и неметаллических материалов, соединенных склейкой и пайкой.

Методы расчета деталей, работающих в тяжелых условиях нагружения, на прочность значительно сложнее, особенно это относится к расчетам деталей авиационной и ракетной техники, поскольку в этих случаях конструктор, стремясь в максимальной степени облегчить изделие, исходит из минимального запаса прочности. Например, для основных деталей авиационных двигателей (коленчатый вал, шатун, лопатки и диск турбины и компрессора) минимальный запас прочности 1,3...1,5, в то время как в общем машиностроении и строительной практике он доходит до 10...15.

Как известно, теоретические значения прочности металла, рассчитываемые по вели-

чине энергии, затрачиваемой на образование двух новых поверхностей при преодолении межатомных связей в идеальной решетке монокристалла, во много раз выше значений «технической» прочности, получаемых при испытании реальных образцов того же металла. Так, для чистого железа теоретическое значение прочности  $>10\ 000$  МПа, а техническое  $\sim 250$  МПа. Это расхождение объясняется наличием различного рода дефектов – несовершенств строения кристаллического тела, влияние которых на свойства этого тела столь значительно, что современную физику твердого тела часто определяют как физику дефектов. К таким дефектам – несовершенствам тонкой структуры – относят прежде всего дислокации, т.е. особые зоны искажений атомной решетки, содержащиеся в реальных кристаллах в огромных количествах (порядка  $10^8 / \text{см}^2$ ).

К дефектам более грубого порядка относят субмикроскопические трещины, по размерам не превышающие предела разрешения оптического микроскопа ( $\leq 0,2$  мкм). Такие трещины, согласно гипотезе Гриффитса, могут образовываться по границам блоков кристалла в процессе его роста, а также появляться в результате приложения напряжений.

В реальном металле – поликристаллическом теле – встречаются еще более грубые дефекты, например *микроскопические трещины* размерами  $>0,2$  мкм. Такие трещины возникают на поверхности стальных деталей в процессе их механической обработки или эксплуатации.

Несмотря на незначительную (порядка нескольких микрометров) глубину, эти трещины резко снижают прочность детали (особенно при работе в условиях сложного напряженного состояния или воздействия поверхностно-активных сред), ускоряя ее разрушение. Удаление поврежденного поверхностного слоя механически (зачисткой тонкой шкуркой, пескоструйной обработкой) или электролитическим растворением существенно повышает прочность детали.

Наиболее грубыми являются микроскопические, видимые в ряде случаев невооруженным глазом дефекты, представляющие собой различного рода нарушения сплошности или однородности металла. Эти дефекты могут стать причиной особенно сильного снижения прочности детали и ее разрушения. С увеличением размеров детали вероятность наличия дефектов возрастает, поэтому реальное снижение

прочности на крупногабаритных деталях проявляется более заметно (масштабный фактор).

Наиболее детально влияние дефектов на работоспособность конструкций изучено для изделий, выполненных сваркой. В большинстве случаев степень влияния того или иного дефекта на работоспособность конструкций устанавливают экспериментально: испытаниями образцов с дефектами.

При сдаче конструкции в эксплуатацию прежде всего оценивают допустимость наличия наружных дефектов. Значения их допустимости, как правило, указаны в технических условиях на изготовление конструкции и зависят от условий ее эксплуатации.

Установлено, что выпуклость шва не снижает статической прочности, однако очень влияет на вибрационную прочность. Чем больше выпуклость шва и, следовательно, меньше угол перехода от основного металла к наплавленному, тем сильнее оно снижает предел выносливости. Таким образом, чрезмерная выпуклость шва может свести к нулю все преимущества, полученные от оптимизации технологического процесса по улучшению качества сварных соединений, работающих при вибрационных, динамических и повторно-статических нагрузках.

Значительным (по влиянию на работоспособность) наружным дефектом является подрез. Он недопустим в конструкциях, работающих на выносливость. Небольшой протяженности подрезы, ослабляющие сечение шва не более чем на 5 %, в конструкциях, работающих под действием статических нагрузок, можно считать позволительными.

**Наплывы**, резко изменяя очертания швов, образуют концентраторы напряжений и, тем самым, снижают выносливость конструкции. Наплывы, имеющие большую протяженность, следует считать недопустимыми дефектами, так как они вызывают концентрацию напряжений и нередко сопровождаются непроварами. Небольшие местные наплывы, вызванные случайными отклонениями сварочных режимов от заданных, разрешаются.

**Кратеры**, как и прожоги, во всех случаях являются недопустимыми дефектами и подлежат исправлению.

Для окончательной оценки качества сварного соединения контролер должен знать значения допустимости наружных и внутренних дефектов, которые указаны в НТД. Результаты

многочисленных исследований показывают, что для пластичных материалов при статической нагрузке (рис. 16.15, кривые 1, 2, 4) влияние величины непровара на уменьшение их прочности прямо пропорционально относительной глубине непровара. Для малопластичных и высокопрочных материалов при статической (см. рис. 16.15, кривые 3, 5), а также при динамической или вибрационной нагрузке (рис. 16.16) пропорциональность между потерей работоспособности и величиной дефекта нарушается.

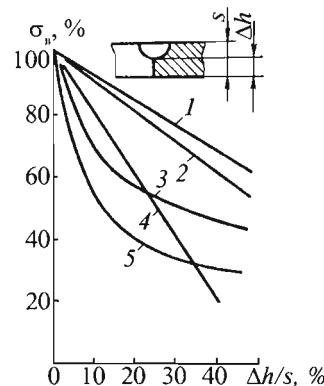


Рис. 16.15. Влияние относительной глубины  $\Delta h/s$  непровара корня шва на статическую прочность стыковых соединений (без выпуклости):  
1 – Ст3; 2 – сталь 12Х18Н9Т; 3 – сталь 25ХГФА;  
4 – сплав D16T; 5 – сталь 30ХГСНА

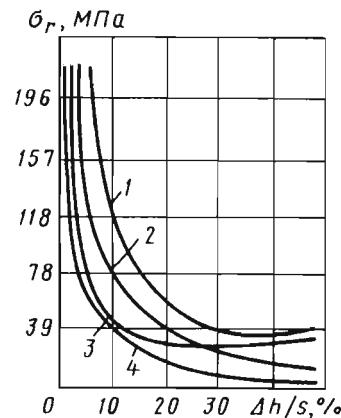


Рис. 16.16. Влияние относительной величины  $\Delta h/s$  дефектов на усталостную прочность стыковых соединений из низкоуглеродистых сталей (без выпуклости):  
1 – подрезов; 2 – пор; 3 – непроваров; 4 – шлаков

Установлено, что поры и шлаковые включения при их относительной суммарной площади в сечении шва до 5...10 % практически мало влияют на статическую прочность соединения (рис. 16.17). Если швы имеют значительную выпуклость, то поры и шлаковые включения суммарной площадью (размером) 10...15 % от сечения шва слабоказываются на статической прочности. Для ряда конструкций (закладные детали,стыки арматуры) в зависимости от места расположения таких дефектов их допустимая величина может составлять 10...25 % от сечения шва.

Такие дефекты, как трещины, оксидные пленки, несплавления, недопустимы.

С учетом всех перечисленных конструктивно-эксплуатационных факторов для альтернативной оценки опасности влияния сварочных дефектов их целесообразно разделить на две группы: объемные и плоскостные. Объемные дефекты не оказывают существенного влияния на работоспособность соединений. Эти дефекты (поры, шлаки, флокены) можно нормировать по размерам или площади ослабления ими сечения изделия. Плоскостные трещиноподобные дефекты (трещины, оксидные пленки, несплавления, раскаты) по НТД, как правило, считаются недопустимыми.

При обнаружении недопустимых наружных или внутренних дефектов их обязательно удаляют. Удаление наружных дефектов следует проводить вышлифовкой с обеспечением плавных переходов в местах выборок. Места выборок можно заваривать в случае, если

сохранилась минимально допустимая толщина стенки детали в месте максимальной глубины выборки. Дефекты с корня шва удаляют по всей длине заподлицо с основным металлом. Если в процессе механической обработки (вышлифовки) не удалось полностью исправить наружные дефекты, то их как недопустимые внутренние дефекты необходимо полностью удалить.

Заглубленные наружные и внутренние дефекты (дефектные участки) в соединениях из алюминия, титана и их сплавов следует удалять только механическим способом: вышлифовкой абразивным инструментом или резанием, а также вырубкой с последующей зашлифовкой. В ряде случаев в конструкциях из стали допускается удалять дефектные участки воздушно-дуговой или плазменной строжкой с последующей обработкой поверхности выборки абразивными инструментами. При этом поверхности изделий из углеродистых и кремнемарганцовистых сталей должны быть зачищены (зашлифованы) до полного удаления следов резки.

Исправление дефектов с заваркой выборок в сварных соединениях, подлежащих обязательной термической обработке и выполненных из легированных и хромистых сталей, нужно проводить после высокого (450...650 °C) отпуска сварного соединения (промежуточного, окончательного или предварительного), за исключением отдельных случаев, оговоренных технологическими инструкциями.

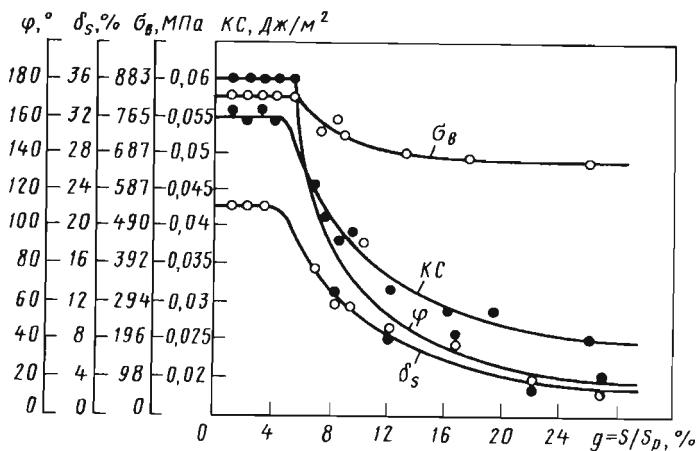


Рис. 16.17. Влияние относительной площади дефектов (пор) на механические свойства стыковых соединений из легированной стали ( $\sigma_b = 850 \text{ МПа}$  после закалки и отпуска)

При удалении дефектных мест целесообразно соблюдать определенные условия. Длина удаляемого участка должна быть равна длине дефектного места плюс 10...20 мм с каждой стороны, а ширина разделки выборки должна быть такой, чтобы ширина шва после заварки не превышала двойной ширины до заварки. Форма и размеры подготовленных под заварку выборок должны обеспечивать возможность надежного провара в любом месте. Поверхность каждой выборки должна иметь плавные очертания без резких выступов, острых углублений и заусенцев. При заварке дефектного участка необходимо перекрыть прилегающие участки основного металла.

После заварки участок надо зачистить до полного удаления раковин и рыхлости в кратере, выполнить на нем плавные переходы к основному металлу.

В сварных швах со сквозными трещинами перед заваркой требуется засверлить их концы, чтобы предотвратить распространение трещин. Дефектный участок в этом случае проваривают на полную глубину.

Заварку дефектного участка проводят одним из способов сварки плавлением (ручной дуговой, дуговой в инертных газах и т.д.).

Исправленные швы сварных соединений должны быть повторно проконтролированы в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству изделия. Если при этом вновь будут обнаружены дефекты, то их исправляют снова с соблюдением необходимых требований. Число исправлений одного и того же дефектного участка зависит от категории ответственности конструкции и, как правило, не превышают трех.

## 16.3. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

### 16.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При радиационном контроле используют три основных элемента (рис. 16.18):

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий прошедшее ионизирующее излучение.

Ионизирующее излучение, проходя через изделие (вещество), взаимодействует с атомными ядрами и электронными оболочками, поглощаясь и рассеиваясь, и вследствие этого испытывает ослабление. Степень ослабления зависит от толщины  $\delta$  и плотности  $\rho$  контролируемого объекта, а также интенсивности  $I$  и энергии  $E$  излучения.

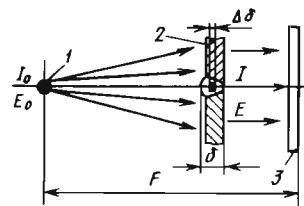


Рис. 16.18. Схема просвечивания:  
1 – источник; 2 – изделие; 3 – детектор;  
 $F$  – фокусное расстояние

В общем виде закон ослабления имеет вид

$$I_1 = I_0 \exp(-\mu_0 \delta), \quad (16.1)$$

где  $I_1$  – интенсивность потока излучения в данной точке пространства, прошедшего через изделие;  $I_0$  – интенсивность потока излучения в той же точке перед изделием;  $\mu_0$  – линейный коэффициент ослабления, характеризующий ослабление излучения на единицу длины пути в данном материале.

**Основные единицы измерения ионизирующего излучения.** Единицей измерения энергии ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ) служит джоуль (Дж). 1 Дж эквивалентен механической работе силы в 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Часто энергию рентгеновского и  $\gamma$ -излучений выражают в килоэлектрон-вольтах (кэВ) или мегаэлектрон-вольтах (МэВ). Электрон-вольт равен энергии, которую приобретает заряженная частица, несущая один элементарный заряд (заряд электрона), при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов в 1 В.

**Активность радиоактивного изотопа** в источнике (любом объекте, содержащем какое-либо количество радиоактивного вещества) определяется числом атомов, распадающихся в единицу времени. Активность радиоактивного изотопа равна произведению постоянной распада на общее число радиоактивных атомов:  $A_{\text{и}} = \omega_p N$ .

Активность изотопа в источнике определяется числом распадов в секунду и в СИ измеряется в беккерелях (Бк). На практике широко применяют внесистемную единицу активности – кюри (Ки). Кюри – активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов/с. Такое число распадов в секунду происходит в 1 г радия.

Отношение активности изотопа в радиоактивном источнике к массе или объему источника называют соответственно *удельной* или *объемной активностью изотопа*.

Из определения активности следует, что чем больше радиоактивного вещества находится в источнике, тем выше активность последнего, и чем больше период полураспада изотопа, тем больше радиоактивного вещества необходимо взять для получения данной активности. Например, активностью в 1 Ки обладает источник со стронцием  $^{90}\text{Sr}$ , в котором находится  $<0,01$  г радиоактивного вещества, в то же время для получения такой же активности источника с ураном  $^{238}\text{U}$  потребовалось бы  $>1$  т природного урана.

**Интенсивностью ионизирующего излучения** (или плотностью потока энергии) называют энергию излучения, падающую в единицу времени на единицу площади, расположенной перпендикулярно к направлению излучения. Единицей интенсивности служит  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . 1  $\text{Вт}/\text{м}^2$  эквивалентен энергии излучения в 1 Дж, падающей на поверхность площадью 1  $\text{м}^2$  в течение 1 с.

Для излучения с частотой  $\nu$  интенсивность  $I$  определяется по формуле  $I = N_k h\nu$ , где  $N_k$  – число квантов энергии, падающих на поверхность площадью 1  $\text{м}^2$  в 1 с;  $h\nu$  – энергия кванта.

В радиационной дефектоскопии для большей части расчетов можно принять рентгеновский излучатель или источник  $\gamma$ -излучения за точечный источник, т.е. за такой источник излучения, линейные размеры которого значительно меньше расстояния между ними и местом регистрации излучения. В таком случае к источникам рентгеновского и  $\gamma$ -излучения применим закон, согласно которому интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника:  $I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2$ .

Для оценки действия ионизирующего излучения в какой-либо среде служат так называемые дозовые характеристики поля излучения. Одна из этих характеристик – **поглощенная доза излучения**  $D_n$  – представляет собой энергию ионизирующего излучения, отнесенную к единице массы облучаемого вещества. Единица поглощенной дозы – грэй (Гр). 1 Гр – это доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения в 1 Дж. Внесистемная единица поглощенной дозы – радиан.

**Мощностью поглощенной дозы** называют дозу, поглощенную в единицу времени. За единицу мощности поглощенной дозы любого вида ионизирующего излучения принят Гр/с, внесистемная единица – рад/с.

**Эквивалентная доза излучения** определяет биологическое воздействие излучения на организм человека. Эквивалентная доза излучения равна произведению поглощенной дозы  $D_n$  излучения в биологической ткани на коэффициент качества  $K$  этого излучения:  $D_{\text{экв}} = KD_n$ . Коэффициент качества  $K$  служит для сравнения различных видов ионизирующего излучения по ожидаемому биологическому эффекту. Например, для  $\beta$ -, рентгеновского и  $\gamma$ -излучений  $K = 1$ ; для потока нейтронов с энергией до 10 МэВ  $K = 10$ , а для  $\alpha$ -излучений с энергией до 10 МэВ  $K = 20$ .

За единицу эквивалентной дозы излучения принят зиверт (Зв). Внесистемная единица эквивалентной дозы – бэр. 1 бэр численно равен 1 рад, деленному на коэффициент качества  $K$ . Единицами мощности эквивалентной дозы излучения являются Зв/с и бэр/с.

**Экспозиционная доза** – характеристика, основанная на ионизирующем действии излучения в сухом атмосферном воздухе. Единица экспозиционной дозы – Кл/кг. 1 Кл/кг соответствует экспозиционной дозе рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, при прохождении которого через 1 кг воздуха в результате всех ионизационных процессов в воздухе образуются ионы, несущие заряд в 1 Кл электричества каждого знака.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р). Рентген – это экспозиционная доза рентгеновского и  $\gamma$ -излучений, при прохождении которых через  $1,293 \cdot 10^{-3}$  г в воздухе в результате завершения всех ионизационных процессов появляются ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака ( $1,293 \cdot 10^{-3}$  г – масса 1  $\text{см}^3$  атмосферного воздуха при 0 °С и давлении 1013 ГПа).

**Мощность экспозиционной дозы** (МЭД), т.е. экспозиционная доза фотонного излучения, отнесенная к единице времени, выражается в А/кг или Р/с. Ампер на килограмм равен мощности экспозиционной дозы рентгеновского и  $\gamma$ -излучений, при которой за 1 с сухому атмосферному воздуху передается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

### 16.1. Основные единицы измерения ионизирующих излучений в СИ и их связь с внесистемными единицами

Характеристика	Единица измерения в СИ	Внесистемная единица	Соотношение между единицами
Энергия ионизирующего излучения	Дж	эВ	$1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ МэВ}$
Активность изотопа	Бк	Ки	$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{11} \text{ Ки}$
Интенсивность ионизирующего излучения	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$\text{МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$1 \text{ Вт}/\text{м}^2 = 6,24 \cdot 10^8 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
Поглощенная доза излучения	Гр	рад	$1 \text{ Гр} = 10^2 \text{ рад}$
Мощность поглощенной дозы излучения	Гр/с	рад/с	$1 \text{ Гр}/\text{с} = 10^2 \text{ рад}/\text{с}$
Эквивалентная доза излучения	Зв	бэр	$1 \text{ Зв} = 10^2 \text{ бэр}$
Мощность эквивалентной дозы излучения	Зв/с	бэр/с	$1 \text{ Зв}/\text{с} = 10^2 \text{ бэр}/\text{с}$
Экспозиционная доза излучения	Кл/кг	P	$1 \text{ Кл}/\text{кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ P}$
Мощность экспозиционной дозы излучения	A/кг	P/с	$1 \text{ A}/\text{кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ P}/\text{с}$

Основные единицы измерения ионизирующих излучений в СИ и их связь с внесистемными единицами приведены в табл. 16.1.

Понятие «**гамма-эквивалент**» (или радиевый гамма-эквивалент) не установлено стандартами, однако эти характеристики источников  $\gamma$ -излучения широко используют при решении многих практических задач.

Если два источника  $\gamma$ -излучения при одинаковых условиях измерения создают одинаковую мощность экспозиционной дозы, то они равны по гамма-эквиваленту.

Измерениями установлено, что 1 мг Ra в виде точечного источника, помещенного в фильтр из платины толщиной 0,5 мм, создает на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы, равную 8,4 Р/ч. Эта величина названа ионизационной постоянной, или гамма-постоянной  $\Gamma$ , радия. Каждый изотоп имеет свою гамма-постоянную, показывающую, какую мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения создает точечный источник данного изотопа активностью 1 мКи на расстоянии 1 см в течение 1 ч. Единица измерения гамма-постоянной  $\text{Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$ .

Гамма-постоянная зависит от схемы радиоактивного распада изотопов, т.е. от числа  $\gamma$ -квантов, приходящихся на один распад, и их энергии. Некоторые радиоактивные изотопы испускают кванты одинаковой энергии, напри-

мер цезий  $^{137}\text{Cs}$ , у которого энергия квантов равна 0,661 МэВ. Такое излучение называют многоэнергетическим (монохроматическим), а его спектр графически представляют в виде одной линии. Большая часть изотопов испускает кванты различных энергий, например спектр излучения кобальта  $^{60}\text{Co}$  состоит из двух основных линий, соответствующих энергиям 1,17 и 1,33 МэВ, спектр излучения ирида  $^{192}\text{Ir}$  имеет 16 основных линий и т.д.

Соотношение между гамма-эквивалентом  $M$  точечного источника излучения и экспозиционной дозой  $D_{\text{жк}}$ , создаваемой источником на расстоянии  $r$ , может быть выражено формулой  $D_{\text{жк}} = 8,4M\tau / r^2$ , где  $\tau$  – время облучения, ч; 8,4 – гамма-постоянная радия.

Период полураспада изотопа  $T_{1/2}$  – время, в течение которого число радиоактивных атомов уменьшается вдвое и  $T_{1/2} = 0,693/\omega_p$ , где  $\omega_p$  – постоянная распада. Период  $T_{1/2}$  не зависит от количества, формы и геометрических размеров изотопов.

Выявление внутренних дефектов при просвечивании основано на способности ионизирующего излучения неодинаково проникать через различные материалы и поглощаться в них в зависимости от толщины, рода (плотности) материалов и энергии излучения. Для выявления дефектов в изделиях с одной стороны устанавливают источник излучения, с другой –

детектор, регистрирующий информацию о внутреннем строении контролируемого объекта (рис. 16.19). Излучение от источника 1 проходит через изделие 2, имеющее внутренние дефекты 3, 4 с разной плотностью. В дефектном и бездефектном местах оно будет поглощаться по-разному и выходить на детектор с разной интенсивностью 5. Интенсивность излучения при прохождении через дефект 3, заполненный воздухом или газом, ослабляется меньше, чем в сплошном металле, и сильнее – над дефектом 4, заполненным более плотным материалом (например, вольфрамом), чем основной.

Разность интенсивностей будет зарегистрирована детектором. В зависимости от вида применяемого детектора различают три основных метода радиационного контроля: радиографический, радиоскопический и радиометрический (рис. 16.20).

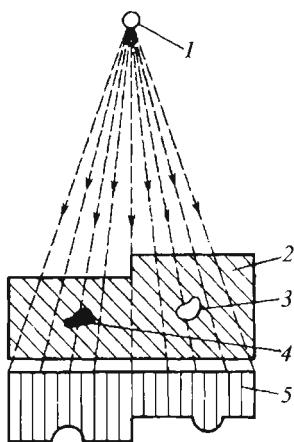


Рис. 16.19. Схема просвечивания изделия

рентгеновским или  $\gamma$ -излучением:

- 1 – источник; 2 – контролируемый объект;
- 3 – раковина; 4 – шлаковое включение;
- 5 – эпюра интенсивности излучения за объектом

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документным подтверждением полученных результатов. В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором – полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гамма-графию, ускорительную и нейтронную радиографию. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной 1...700 мм.

Радиационная интроскопия – метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем полученное изображение анализируется в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами; экспрессность и непрерывность контроля.



Рис. 16.20. Классификация методов радиационного контроля

Радиометрическая дефектоскопия – метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различных величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

### 16.3.2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Согласно классификационной схеме (рис. 16.21) тормозное излучение получают на рентгеновских аппаратах, в ускорителях электронов и от  $\beta$ -источников с мишенью.

**Рентгеновские аппараты.** Рентгеновская установка состоит из рентгеновского излучате-

ля, источника высокого напряжения и пульта управления (рис. 16.22). Высоковольтный генератор преобразует напряжение сети в напряжение питания рентгеновской трубы. Высоковольтный генератор включает в себя: преобразователи переменного тока в постоянный (диоды кенотронов), конденсаторы для фильтрации и удвоения напряжения, трансформаторы накала рентгеновской трубы, трансформаторы накала кенотронов, выключатели и защитные устройства.

Пульт управления содержит группу приборов, которые служат для измерения и регулирования времени, тока, напряжения и частоты.

Рентгеновский излучатель (рис. 16.23) состоит из рентгеновской трубы и защитного кожуха, заполненного изолирующей средой: трансформаторным маслом, воздухом или газом под давлением. Оболочка трубы представляет собой заполненный стеклянный баллон или выполнена по металлокерамической технологии. Нить накала чаще всего выполняется из вольфрама. Нагретая до температуры 2200...2500 °C током нить накала является источником свободных электронов. Фокуси-

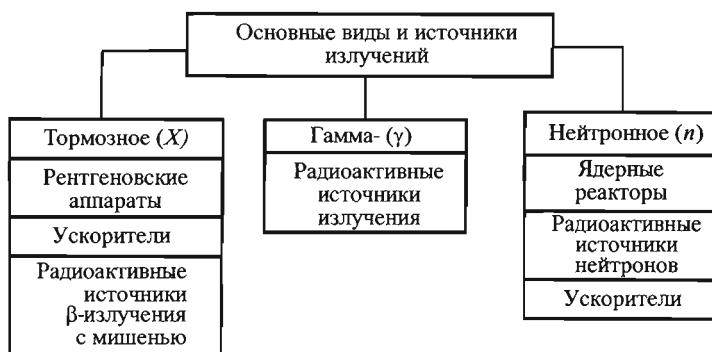


Рис. 16.21. Классификация источников ионизирующих излучений

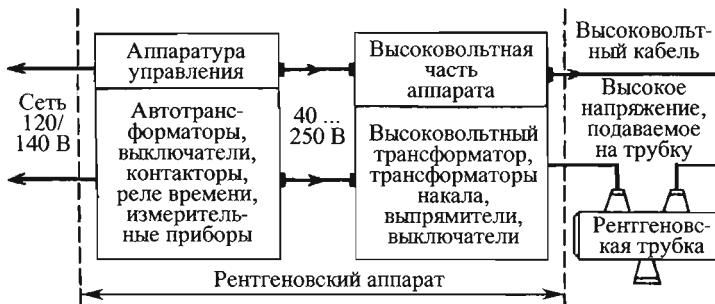


Рис. 16.22. Структурная схема рентгеновской установки

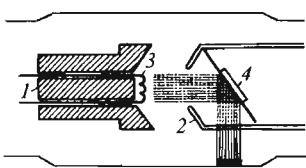


Рис. 16.23. Схема рентгеновской трубки:  
1 – катод; 2 – фокусирующие пластины;  
3 – нить накала; 4 – анод

рующие пластины создают вокруг катода электрическое поле такой конфигурации, при которой свободные электроны движутся к аноду узким электронным пучком. При торможении электронного пучка на аноде почти вся кинетическая энергия электронов превращается в энергию рентгеновского излучения. Эта часть энергии зависит от анодного напряжения  $U$  и порядкового номера материала анода  $Z$ :

$$E = 1,14 \cdot 10^{-7} ZU.$$

Например, при использовании вольфрамового анода и напряжении на трубке 60 кВ в энергию рентгеновского излучения превращается немногим  $>0,1\%$  энергии тормозящихся электронов. При напряжении 100 кВ КПД трубы увеличивается до 1 %. При 2 МэВ он достигает 10 %, а при 15 МэВ  $>50\%$ .

С увеличением тока трубы при постоянном напряжении возрастает интенсивность излучения (рис. 16.24, а). Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе изменяет спектр излучения со смещением максимума излучения в сторону коротких волн:  $\lambda_{\min} = 12,4/U$  (рис. 16.24, б).

Для характеристики оптических свойств рентгеновских трубок вводят понятия действительного и эффективного фокусных пятен трубы. *Действительным фокусным пятном*

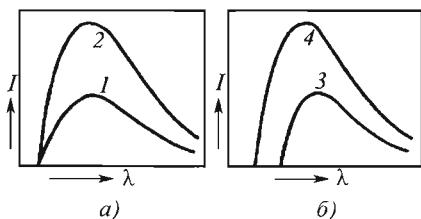


Рис. 16.24. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от тока (а) и напряжения (б):  
1 – малый ток; 2 – большой ток;  
3 – низкое напряжение;  
4 – высокое ускоряющее напряжение

называют участок поверхности мишени, на котором преимущественно тормозится пучок электронов, *эффективным фокусным пятном*, или оптическим фокусом, – проекцию действительного фокусного пятна в направлении оси рабочего пучка излучения на плоскость, перпендикулярную к этой оси.

Различают трубы с круглым и линейным (с отношением сторон  $\leq 1,25$ ) оптическими фокусами. Круглый фокус получают с помощью нити накала в виде плоской архimedовой спирали, линейный – посредством нити накала в форме цилиндрической спирали.

Для улучшения четкости изображения на рентгенограммах желательно иметь фокусные пятна возможно меньших размеров. В то же время уменьшение размеров действительного фокусного пятна при данной эффективности системы охлаждения анода снижает мощность рентгеновской трубы. Это вызвано тем, что удельная электрическая нагрузка на фокусное пятно, т.е. мощность, приходящаяся на единицу его площади, ограничена. Например, для медного анода с вольфрамовой мишенью удельная нагрузка не может превышать  $2200...2500 \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot \text{с})$ . Поэтому широко применяют трубы с линейным фокусом, в которых можно получить оптический фокус, значительно меньший действительного по величине (рис. 16.25). В этих трубах действительное фокусное пятно имеет форму прямоугольника, в то время как оптический фокус представляет собой квадрат.

Электрические свойства рентгеновской трубы характеризуются анодным напряжением  $U$ , анодным током  $I_a$  и током накала  $I_n$  (рис. 16.26). На начальном участке кривых повышение анодного напряжения вызывает увеличение анодного тока. Это объясняется тем, что по мере возрастания напряжения все большее число электронов из электронного облака, образованного раскаленной спиралью,

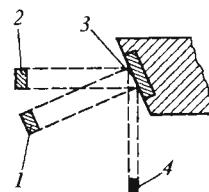


Рис. 16.25. Схема формирования оптического фокуса рентгеновской трубы:  
1 – действительное фокусное пятно; 2 – сечение электронного пучка; 3 – анод; 4 – оптический фокус

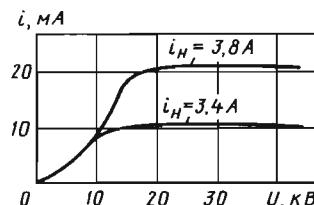


Рис. 16.26. Электрические характеристики рентгеновской трубы

приобретает скорость, достаточную для преодоления тормозящего поля пространственного заряда к катоду трубы. При определенном для данного тока накала анодном напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода. При этом наступает режим насыщения, при котором дальнейшее увеличение анодного напряжения не повышает анодный ток. На этом участке характеристики, называемом участком насыщения, анодный ток зависит только от тока накала, т.е. от числа свободных электронов. Участок насыщения является рабочим участком рентгеновской трубы. В условиях эксплуатации энергия рентгеновского излучения регулируется изменением анодного напряжения, а интенсивность излучения – изменением тока накала.

В рентгенодефектоскопических аппаратах используют трубы, различные по конструкции и способам получения и формирования пучка излучения. Выбор рентгеновской трубы для конкретных условий контроля определяется его схемой, конструктивными особенностями просвечиваемого объекта, его материалом, толщиной и т.д.

В радиационной дефектоскопии чаще всего используют двухэлектродные рентгеновские трубы напряжением до 420 кВ. При более высоких напряжениях наблюдаются автоэлектронная эмиссия, электрические пробои, рассеяние и отражение электронов. Поэтому высоковольтные трубы не могут быть двухэлектродными, а только секционными, состоящими из катода, промежуточных электродов и полого анода. Число промежуточных электродов и напряжения на них подбирают так, чтобы исключить возможность возникновения автоэлектронной эмиссии. Полый анод полностью улавливает отраженные электроны, а большое расстояние между анодом и катодом предотвращает электрические пробои. Анод секционной трубы имеет фокусирующую катушку, позволяющую регулировать размеры фокусного пятна.

Для просвечивания объектов со свободной полостью внутри, доступ к которым затруднен, предназначены также рентгеновские трубы с вынесенным анодом (рис. 16.27). Анод трубы представляет собой медную полую трубу, далеко выступающую за пределы стеклянной колбы. Вольфрамовая мишень находится внутри этой трубы, в конце ее консольной части. Снаружи на трубу надевают тонкостенную латунную оболочку, в промежутке между трубой и оболочкой циркулирует охлаждающая вода.

Из-за большого расстояния между катодом и анодом в трубках подобной конструкции электрическая фокусировка электронного пучка оказывается недостаточной, поэтому прибегают к дополнительной магнитной фокусировке. Для этого на трубу анода надевают специальную фокусирующую катушку, при прохождении электрического тока через которую создается магнитное поле, суживающее электронный пучок. Степень фокусировки пучка регулируется изменением тока катушки. В зависимости от конструкции излучающей части вынесенного анода могут быть получены рабочие пучки излучения различной формы: кольцевой (рис. 16.28, а), направленной (см. рис. 16.28, б) и торцовой (см. рис. 16.28, в). В последнем случае анод имеет так называемую «прострельную» мишень, представляющую собой тонкую медную стенку.

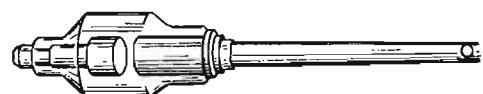


Рис. 16.27. Рентгеновская трубка с вынесенным анодом

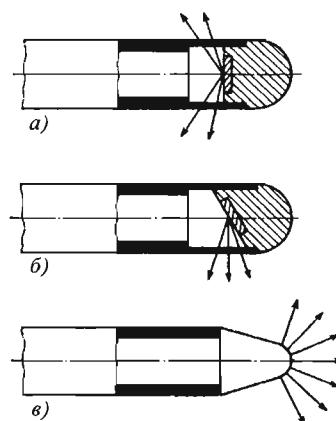


Рис. 16.28. Излучающая часть полого анода

Для просвечивания движущихся объектов и в случаях, когда нужно получить минимальный оптический фокус при большой мощности, применяют *трубы с вращающимся анодом* (рис. 16.29). В этих трубках вращается вольфрамовая мишень в форме усеченного конуса, на боковую поверхность которого направлен поток электронов, испускаемых катодом. Подобное устройство позволяет повысить мощность этой трубы по сравнению с трубками с неподвижным анодом в десятки раз. В трубках с вращающимся анодом вал, на котором укреплена мишень, является ротором асинхронного двигателя. Статор двигателя расположен снаружи трубы. Поскольку охлаждение анода осуществляется только в результате вращения мишени, эти трубы эффективны при времени экспозиции до 5 с; дальнейшее увеличение его резко сокращает их мощность.

Трубка с вращающимся анодом и обычные двухэлектродные трубы могут быть выполнены двухфокусными. Катод двухфокусной трубы имеет две спирали: большую и малую, позволяющие получить два различных по величине линейных фокуса. Благодаря этому расширяется диапазон применения данной трубы.

Особый класс составляют импульсные рентгеновские трубы. Свободные электроны в них получают в результате автоэлектронной эмиссии при создании у катода трубы электрического поля напряженностью  $>10^8$  В/м. Импульсные трубы называют также трубками с «холодным» катодом (в отличие от трубок с «горячим» катодом, в которых для получения свободных электронов используют термоэлектронную эмиссию).

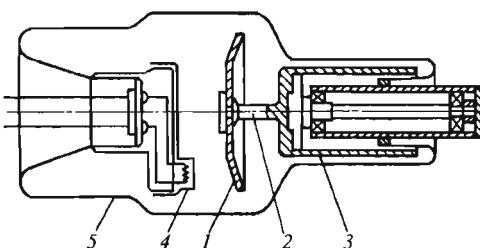


Рис. 16.29. Рентгеновская трубка с вращающимся анодом:

- 1 – анод;
- 2 – стержень анода;
- 3 – ротор;
- 4 – катод;
- 5 – баллон

По конструкции различают двух- и трехэлектродные импульсные рентгеновские трубы. Наиболее распространены двухэлектродные трубы. В такой трубке анод представляет собой остrozаточенную вольфрамовую иглу, расположенную по оси вакуумной колбы, а катод – диск или цилиндр с заостренными кромками, концентрично расположенный относительно анода. Электроды трубы выполняют заостренными для увеличения напряженности электрического поля.

Источниками анодного напряжения являются высоковольтные импульсные трансформаторы; амплитуды анодного напряжения обычно 200...350 кВ. При подаче на электроды импульса напряжения в трубке возникает автоэлектронная эмиссия, в результате которой между анодом и катодом проходит электрический разряд, носящий характер пробоя в вакууме. Анод трубы при бомбардировке его электронами дает импульс рентгеновского излучения длительностью  $10^{-9}\dots10^{-6}$  с.

Недостатком двухэлектродных импульсных трубок является нестабильность интенсивности и спектрального состава излучения, обусловленная тем, что напряжение на аноде, при котором происходит пробой анодно-катодного пространства, сильно изменяется от включения к включению. В трехэлектродных импульсных трубках этот недостаток устраняют введением в трубку дополнительно поджигающего электрода. При приложении импульса пониженного напряжения ( $\sim 10$  кВ) между поджигающим электродом и катодом в строго заданный момент времени возникает дуговой разряд, который затем переходит в разряд между анодом и катодом.

Импульсные трубы имеют большую мгновенную мощность, а достигнутая частота повторения импульса  $\leq 50$  Гц. Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м  $\leq 2$  Р/мин, тогда как трубы с горячим катодом при таких же напряжениях (250...300 кВ) дают до 10 Р/мин. Ресурс работы импульсных рентгеновских трубок много меньше, чем трубок накала. В России широкое применение нашли импульсные аппараты сер. АРИНА с анодным напряжением 170...240 кВ для контроля изделий толщиной 30...40 мм.

По виду высоковольтной электрической изоляции рентгеновской трубы в защитном кожухе или блок-трансформаторе (модуле) рентгеновская промышленная аппаратура подразделяется на рентгеновскую аппаратуру:

- с масляной высоковольтной изоляцией (применяют трансформаторное масло, обработанное дополнительно на фильтр-прессе и в

вакуумной камере, а также специальное синтетическое масло);

- с высоковольтной газовой изоляцией под давлением (используют фреон или шестифтористую серу под давлением  $3 \cdot 10^5$  Па);

- с воздушной высоковольтной изоляцией рентгеновской трубы в защитном кожухе.

Аппараты, в которых в качестве высоковольтной изоляции служит атмосферный воздух, встречаются редко.

По геометрии рабочего пучка рентгеновского излучения блок-трансформаторы (защитные кожухи) с рентгеновскими трубками подразделяются на следующие основные типы:

- рентгеновские с направленным выходом рентгеновского излучения, например в форме конуса с углом при вершине  $30\ldots60^\circ$ ;

- рентгеновские с панорамным (круговым) выходом рентгеновского излучения.

В рентгеновской аппаратуре с анодным напряжением в диапазоне  $0,4\ldots2,0$  МВ, когда генерируемое на аноде тормозное излучение «просвечивает» само зеркало анода, различают отраженный пучок излучения и проходящий.

Излучение проходящего пучка обладает значительно большей энергией, чем излучение отраженного пучка (благодаря фильтрации мягкой составляющей тормозного излучения в материале анода рентгеновской трубы).

В настоящее время для промышленной рентгенофотоскопии применяют в основном переносные рентгеновские аппараты с постоянной нагрузкой в виде:

- переносного (транспортабельного) блок-трансформатора (мобилок) с рентгеновской трубкой;

- переносного пульта управления чехольчатого типа;

- комплекта соединительных низковольтных кабелей (и водопроводных шлангов для охлаждения блок-трансформатора).

Современную переносную (портативную) рентгеновскую аппаратуру разрабатывают и изготавливают едиными сериями с учетом возможности просвечивания материалов в широком диапазоне толщин. За базу построения такой серии аппаратов принимают анодное напряжение рентгеновской трубы.

Большинство ведущих иностранных фирм принимают следующий базовый ряд наибольшего напряжения рентгеновской трубы: 10...80; 50...140; 50...200 (220); 80...300; 35...160; 60...250; 100...400 кВ.

В России выпускаются портативные рентгеновские аппараты серии «Шмель» с анодным напряжением 80...220 кВ для контроля изделий толщиной до 50 мм.

**Импульсная рентгеновская аппаратура.** К разряду переносной аппаратуры для промышленного просвечивания можно отнести и импульсную рентгеновскую аппаратуру с анодными напряжениями до 0,5 МВ. Принцип действия их основан на возникновении кратковременной (0,1...0,2 мс) вспышки тормозного рентгеновского излучения при электрическом пробое вакуума в двухэлектродной рентгеновской трубке (с холодным катодом) под действием импульса анодного высокого напряжения (220...280 кВ), возникающего на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора при разряде накопительной емкости ( $U_p = 7,5\ldots10$  кВ) через первичную обмотку высоковольтного трансформатора.

Передвижная (разборная) рентгеновская аппаратура для промышленного просвечивания предназначена для работы в лабораторных условиях. Она позволяет оборудовать временные (передвижные) и стационарные рентгенофотоскопические установки.

**Радиоактивные источники.** Атомные ядра всех химических элементов состоят из элементарных частиц – протонов и нейтронов. Протон и нейtron считаются двумя различными зарядовыми состояниями одной и той же частицы, именуемой нуклоном. Количество протонов в ядре обозначается  $Z$ , нейтронов –  $N$ . Полное число нуклонов в ядре  $A = N + Z$  называется *массовым числом ядра*.

Большая часть химических элементов имеет несколько разновидностей атомов, отличающихся друг от друга числом нейтронов  $N$  в ядре. Такие атомы (и, соответственно, ядра) именуют *изотопами*. К настоящему времени известно около 300 устойчивых и свыше 1000 неустойчивых изотопов.

Атомы, имеющие одно и то же полное число нуклонов в ядре  $A$ , но различающиеся числом протонов  $Z$ , называются *изобарами*. Устойчивые изобары большей частью встречаются парами:  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{54}\text{Cr}$  и  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{112}\text{Cd}$  и  $^{112}\text{Sn}$ . Известно 59 устойчивых изобарных пар и 5 изобарных триад.

Конкретное ядро с данными  $A$  и  $Z$  называют *нуклидом*.

Между одноименно заряженными частицами ядра (протонами) действуют силы электростатического отталкивания. С увеличением атомного номера элемента, т.е. с возрастанием числа протонов в ядре, действие электростатических сил отталкивания становится все сильнее. У тяжелых элементов с  $Z > 82$  ядерные силы уже неспособны обеспечивать устойчивость ядер и начинается самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов в более

устойчивые (обычно в изотопы другого элемента). Это явление называют *радиоактивностью*, или радиоактивным распадом. *Радиоактивный распад* ядер сопровождается испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц ( $\alpha$ - и  $\beta$ -излучением) и квантов  $\gamma$ -излучения.

Альфа-частицы представляют собой ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Они несут положительный заряд, равный 2 ед. заряда, отклоняются в магнитном и электрическом полях (рис. 16.30). Пробег  $\alpha$ -частиц в веществе мал, в воздухе достигает 11 см, в биологической ткани 0,1 мм,  $\alpha$ -частицы полностью поглощаются слоем алюминия 0,01 мм.

Бета-частицы – это электроны или позитроны. Под действием магнитного и электрического полей они отклоняются от прямолинейного направления, пробег их в воздухе достигает 10 м, в биологической ткани 10...12 мм и полностью поглощаются 6-мм листом из алюминиевого сплава или слоем свинца толщиной 1 мм.

Гамма-излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны (~0,1 нм); заряда не несет, магнитным и электрическим полями не отклоняется;  $\gamma$ -излучение может проникать через стальные изделия толщиной до 500 мм, что обуславливает его преимущественное использование для дефектоскопии материалов.

Гамма-излучение может быть получено при распаде как естественных, так и искусственных изотопов. Последние получают облучением активных заготовок в нейтронных потоках ядерных реакторов ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ), разделением остаточных продуктов деления горючего ядерного реактора ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) облучением

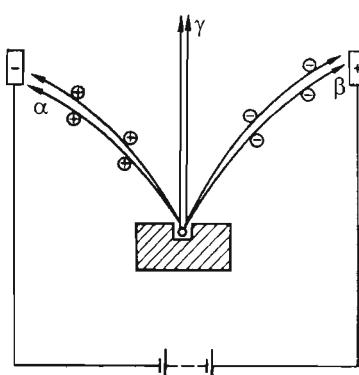


Рис. 16.30. Отклонение излучений в электрическом поле

неактивных заготовок – мишеней на циклотронах ( $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ). Естественные изотопы ( $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ ) для радиационного контроля не используются. Изотопы являются активной частью источника излучения. Их помещают в герметизированные ампулы. Ампулы могут быть заваренные, завальцованные и на резьбе (рис. 16.31 и 16.32). Способ герметизации, материал и число ампул зависят от МЭД излучения физического состояния и свойств изотопов. Основными радиационно-дефектоскопическими характеристиками изотопов являются: энергия излучения  $E$ , мощность экспозиционной дозы  $P$ , удельная активность источника, период полураспада ( $T_{1/2}$ ).

Радиоактивные источники  $\gamma$ -излучения представляют собой ампулы, заполненные  $\gamma$ -активным нуклидом. Источники можно разделить на следующие группы: высокоенергетические ( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и другие источники с эффективной  $E_{\text{эф}} \geq 0,8$  МэВ), средненеэнергетические ( $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др. с  $0,3 < E_{\text{эф}} < 0,8$  МэВ), низкоэнергетические ( $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{75}\text{Se}$  и др. с  $E_{\text{эф}} < 0,3$  МэВ).

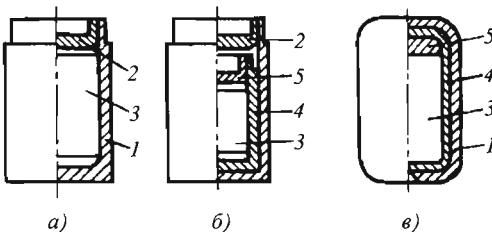


Рис. 16.31. Конструкции радиоактивных дефектоскопических источников отечественного производства:

*a, б* – заваренных; *в* – завальцованных;  
1 – наружная ампула; 2, 5 – крышки;  
3 – активная часть; 4 – внутренняя ампула

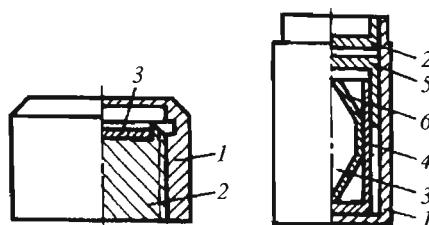


Рис. 16.32. Конструкции радиоактивных дефектоскопических источников:

на резьбе и сварного:  
1 – наружная ампула; 2, 5 – крышки;  
3 – активная часть; 4 – внутренняя ампула;  
6 – баллон

В промышленности наиболее широко применяют источники  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ , реже  $^{145}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Eu}$  и др. в связи с их высокой стоимостью, сложностью получения исходного сырья и трудностью отделения сопутствующих примесей.

**Радиоактивные источники быстрых нейтронов.** Ядра некоторых радионуклидов при распаде испускают  $\alpha$ -частицы или  $\gamma$ -кванты с энергией, превышающей порог реакций ( $\alpha, n$ ) и ( $\gamma, n$ ) на некоторых легких элементах. На основе таких нуклидов можно создавать достаточно простые и компактные источники нейтронов. Энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых  $\alpha$ -радиоактивными нуклидами ( $^{210}\text{Po}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ), обычно 5...6 МэВ. Под воздействием таких частиц реакция ( $\alpha, n$ ) с относительно большой вероятностью осуществляется лишь на ядрах некоторых легких элементов (бериллий, бор, фтор, литий), которые в основном и используются в качестве мишени в рассматриваемых источниках. В зависимости от энергии  $\alpha$ -частиц максимальная энергия нейтронов, возникающих в реакции ( $\alpha, n$ ) на бериллии, боре и фторе, не превышает соответственно 10...12, ~6 и ~3 МэВ, а средняя энергия нейтронов для этих источников соответственно 3,5...4,5; 2,5...3 и 1...1,5 МэВ.

Сравнивая энергию  $\gamma$ -излучения радионуклидов с энергией связи нейтронов в различных атомных ядрах, видим, что при создании фотонейтронных источников в качестве источников  $\gamma$ -излучения можно использовать ограниченное число радионуклидов, а как мишени – только бериллий и дейтерий, у которых энергия связи нейтронов в ядрах соответственно 1,6665 и 2,226 МэВ. Реакцию ( $\gamma, n$ ) могут вызвать лишь  $\gamma$ -кванты, энергия которых превышает указанную энергию связи нейтрона.

Конструктивно фотонейтронные источники обычно представляют собой блок из бериллия или тяжелой воды с линейными размерами в несколько сантиметров, внутри которого размещается в герметичной ампуле источник  $\gamma$ -излучения.

Из различных фотонейтронных источников наиболее широко применяют ( $^{124}\text{Sb} + \text{Be}$ )-источник, что объясняется относительно большим периодом полураспада  $^{124}\text{Sb}$  (60 дней) и возможностью получения высокой удельной активности сурьмы.

Существенными недостатками всех активных фотонейтронных источников являются: малые периоды полураспада пригодных радионуклидов, сложность получения требуемых активностей и высокий фон  $\gamma$ -излучения.

Среди радиоактивных источников нейтронов особое место занимают источники  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ , основанные на спонтанном (самопроизвольном) делении ядер.

Наиболее предпочтительным для изготовления является  $^{252}\text{Cf}$ .

Так как при радиационном контроле используют в основном тепловые нейтроны, то быстрые нейтроны, выходящие из радиоактивного источника, пропускают через замедлитель, выполненный из легких элементов. При этом поток тепловых нейтронов становится в  $10^3$  раз меньше потока быстрых нейтронов, выходящих из источника.

При просвечивании изделий в случае использования геометрии узкого пучка излучения (отношение длины коллиматора к его ширине  $\geq 10 : 1$ ) степень ослабления потока быстрых нейтронов из источника в поток тепловых нейтронов в месте установки детектора  $10^6$ . Таким образом, если необходима плотность потока тепловых нейтронов  $10^4 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ , то соответствующий выход быстрых нейтронов из источника должен составлять  $10^{10} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

**Гамма-дефектоскопы.** Их используют в основном в полевых и монтажных условиях при отсутствии источников электропитания, изделий, расположенных в труднодоступных местах. В общем случае гамма-дефектоскоп состоит из источника излучения (изотопа), заключенного в герметичную металлическую ампулу, которая помещается в защитную радиационную головку (контейнер), и пульта управления, обеспечивающего выпуск и перекрытие пучка излучения.

В комплект гамма-дефектоскопа входят также вспомогательное оборудование и принадлежности (транспортные тележки, штативы для крепления радиационной головки, контейнеры для безопасного транспортирования и перезарядки источников излучения и др.). Выпускают гамма-дефектоскопы двух видов: универсальные шлангового типа, у которых источник излучения подается к месту контроля по шлангу-ампулопроводу, и для фронтального и панорамного просвечивания (ампула не выходит за пределы радиационной головки). В аппаратах шлангового типа пучок излучения формируется с помощью сменных коллиматоров.

рующих головок. Защитные блоки радиационных головок, контейнеры и коллиматоры гамма-дефектоскопов изготавливают из свинца, сплавов на основе вольфрама, обедненного урана или их комбинаций.

**Шланговые гамма-дефектоскопы** нашли наиболее широкое применение в промышленности в связи с тем, что они обеспечивают подачу источника излучения из радиационной головки 2 по шлангу-ампулопроводу 3 в коллимирующую головку на расстояние 5...12 м (рис. 16.33).

В этих аппаратах источник излучения подается по ампулопроводу с помощью гибкого троса, находящегося в зацеплении с зубчатым приводным колесом.

Гамма-дефектоскопы снабжены набором источников  $\gamma$ -излучения с различными разме-рами активной части и МЭД  $\gamma$ -излучения. Набор источников размещается в магазине-контейнере, что позволяет просвечивать изделия различной толщины на различных фокусных расстояниях.

Шланговые гамма-дефектоскопы типа «Гаммарид» выполнены из унифицированных блоков. Для промышленности наиболее эффективными являются малогабаритные дефектоскопы «Гаммат-Се» на основе селена.

**Гамма-дефектоскопы для фронтального и панорамного просвечивания.** Аппараты этого типа предназначены для использования в полевых, монтажных и стапельных условиях в тех случаях, когда применение шланговых аппаратов невозможно из-за ограниченных размеров радиационно-защитных зон. Пример такого дефектоскопа показан на рис. 16.34.

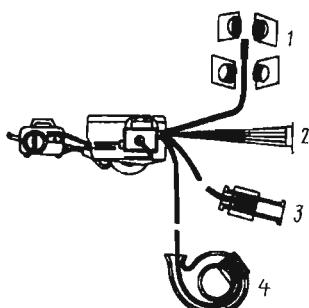


Рис. 16.33. Технологические возможности универсальных шланговых гамма-дефектоскопов:

- 1 и 2 – панорамное и фронтальное просвечивание соответственно; 3 – просвечивание трубопроводов;
- 4 – просвечивание в труднодоступных местах

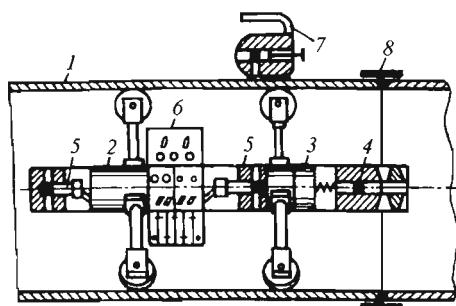


Рис. 16.34. Гамма-дефектоскоп для контроля трубопроводов внутри трубы:  
1 – труба; 2 – привод тележки;  
3 – привод источника; 4 – радиационная головка;  
5 – датчик с коллиматором; 6 – блок автоматики;  
7 – реперный контейнер; 8 – пленка

### 16.3.3. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

Ввиду низкой энергии  $\gamma$ -квантов рентгеновских источников излучения и радиоактивных источников предел толщины просвечиваемых деталей ограничен, так как при их использовании нерационально возрастает время про-свечивания.

Для источников с определенной энергией излучения существует предельная толщина контролируемого изделия, выше которой кон-троль практически невозможен.

Для дефектоскопии изделий большой толщины и сложной формы применяют источники тормозного излучения с энергией до не-скольких десятков мегазэлектрон-вольт. Такими источниками излучения являются: электроста-тические генераторы, ускорители прямого дей-ствия, бетатроны, линейные ускорители, мик-ротроны.

**Бетатрон** – циклический ускоритель электронов. Действие его основано на законе электромагнитной индукции, согласно которому вокруг изменяющегося во времени магнитного потока образуется вихревое электриче-ское поле, напряженность которого определя-ется скоростью изменения магнитного потока (рис. 16.35, б).

Электроны в бетатроне ускоряются по замкнутой орбите постоянного радиуса под действием силы электрического поля. Совершив полный оборот, они приобретают эн-ergyю, равную произведению напряженности электрического поля на заряд электрона и дли-ну траектории. Энергия электрона увеличива-ется до тех пор, пока электрическое вихревое поле не изменит свое направление.

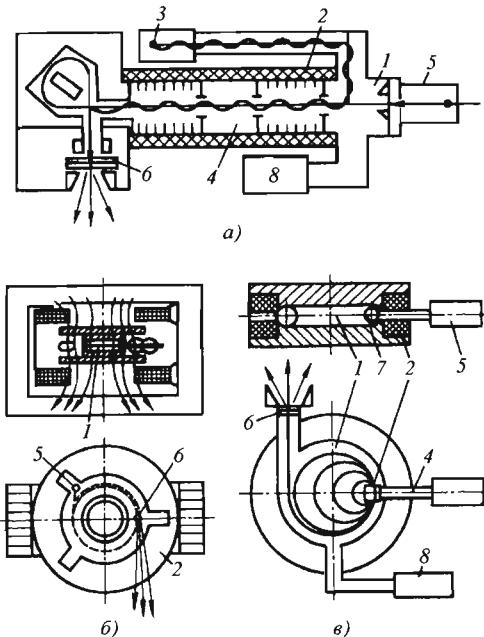


Рис. 16.35. Схема ускорителей:

а – линейного; б – бетатрона; в – микротрона;  
 1 – камера; 2 – электромагнит; 3 – генератор;  
 4 – волновод; 5 – электронная пушка; 6 – мишень;  
 7 – резонатор; 8 – вакуумный насос

Для сохранения постоянства радиуса орбиты, по которой движутся электроны в процессе ускорения, необходимо, чтобы скорость электронов повышалась пропорционально увеличению напряженности магнитного поля. Это условие выполняется в том случае, если напряженность магнитного поля на орбите в любой момент времени меньше средней напряженности магнитного поля внутри орбиты. Поле в области движения электронов делают спадающим по радиусу, что обеспечивает вертикальную фокусировку электронов.

По способу создания магнитного поля бетатроны могут быть с магнитопроводом из пластин трансформаторной стали; безжелезные, в которых магнитный поток создается системой соленоидов или витков с током без применения ферромагнитных материалов, и полулюбезжелезные, в которых магнитный поток лишь на отдельных участках проходит по магнитопроводу из ферромагнитного материала.

На практике широко применяют бетатроны первых двух типов.

По условиям применения бетатроны подразделяют на транспортабельные (передвижные и переносные) и стационарные.

**Передвижные и переносные бетатроны** предназначены для радиографического контроля качества различных промышленных изделий и сварных соединений непосредственно в заводских цехах и на строительных площадках.

**Стационарные бетатроны** рассчитаны на работу в специально оборудованных лабораториях радиационного контроля и отличаются от транспортабельных бетатронов повышенными мощностью дозы и энергией тормозного излучения, а также большими массой и габаритными размерами отдельных узлов и блоков ускорителя.

При эксплуатации стационарных установок в дефектоскопических лабораториях излучатель монтируют либо на неподвижном основании, либо на мостовом кране, либо на специальном механизме перемещения.

Особую группу стационарных бетатронов представляют сильноточные бетатроны и стереобетатроны непрерывного и импульсного действия.

Сильноточные бетатроны используют для высокопроизводительного контроля качества изделий большой толщины, а импульсные установки – для дефектоскопии движущихся объектов и съемки быстропротекающих процессов. Например, при просвечивании стальных изделий толщиной 200 и 510 мм тормозным излучением сильноточного бетатрона время просвечивания составило 3 с и 40 мин соответственно.

Максимальная энергия в спектре тормозного излучения лишь немного меньше максимальной энергии ускоренных в бетатроне электронов, но квантов с такой энергией в спектре излучения очень мало. Эффективная энергия излучения зависит от максимальной и составляет обычно 0,3...0,5 этой величины.

Важными характеристиками ускорителя являются размеры фокусного пятна и пространственное распределение МЭД излучения в рабочем пучке.

Размеры фокусного пятна определяют геометрическую нерезкость. В отличие от рентгеновских аппаратов, линейных ускорителей и микротронов размеры фокусного пятна на мишени бетатрона малы и составляют доли квадратного миллиметра.

Благодаря наличию квантов высокой энергии бетатронами можно проводить радиографический контроль изделий сложной конфигурации без специальных компенсаторов. Основные преимущества бетатрона перед дру-

гими устройствами – простота и надежность в эксплуатации. Кроме того, можно плавно изменять энергию МЭД излучения, для каждого конкретного случая выбрать режим работы ускорителя (энергию излучения) и улучшить выявляемость дефектов.

Применяя в качестве источника проникающего излучения бетатроны, можно контролировать качество стальных изделий толщиной до 600 мм методами и средствами промышленной радиографии и радиометрической дефектоскопии.

Принцип действия линейного ускорителя электронов основан на том, что электроны, введенные с некоторой начальной скоростью вдоль оси цилиндрического волновода, в котором возбуждается бегущая электромагнитная волна с предельной компонентой электрического поля, попадая в ускоряющую полуволну, ускоряются под действием электрического поля. Для непрерывного увеличения энергии электронов необходимо, чтобы электромагнитная волна двигалась вдоль волновода с такой скоростью, при которой электрон не выходит за пределы ускоряющей полуволны. С целью получения требуемой для ускорения электронов скорости электромагнитной волны внутри волновода устанавливают диафрагмы. Таким образом, диафрагмированный волновод является основным узлом линейного ускорителя электронов.

Преимущество линейных ускорителей состоит в большой интенсивности тормозного излучения. Так, линейные ускорители с энергией 10...25 МэВ создают тормозное излучение, МЭД которого 2 000...25 000 Р/мин на расстоянии 1 м от мишени.

В России создан ряд ускорителей с энергией 6...25 МэВ для промышленной дефектоскопии и радиационных процессов.

За рубежом линейные ускорители широко применяют при радиационном контроле. Так, фирма «Varian International» (США) разработала ~30 линейных ускорителей промышленного применения.

Отечественные линейные ускорители ЛУЭ-10/1 и ЛУЭ-10-2Д предназначены для контроля стальных изделий толщиной 400...500 мм в промышленных условиях. Ускорители представляют собой компактные установки, состоящие из излучателя, теплообменников и блоков электропитания и управления. Излучатель снабжен рентгеновской головкой, позволяющей получать равномерное по интенсивно-

сти поле тормозного излучения. При просвечивании стальных изделий толщиной 400 мм ускорителем ЛУЭ-10-2 время экспозиции ~7 мин при относительной чувствительности 1 %.

**Микротрон** – циклический ускоритель с переменной кратностью ускорения. В нем частицы движутся в постоянном и однородном магнитном поле. Ускорение происходит под действием переменного электрического поля постоянной частоты. Электроны, находящиеся в вакуумной камере, движутся по орбитам – окружностям, имеющим общую точку касания. В этом месте расположен резонатор, сверхвысокочастотное поле которого ускоряет электроны. Резонатор возбуждается импульсным магнетроном.

При прохождении через резонатор электроны приобретают определенную энергию  $\Delta E$  и начинают двигаться по следующей орбите. При достижении последней орбиты электроны либо попадают на мишень, либо через канал выводятся из камеры (см. рис. 16.35, в).

Основное преимущество микротрона заключается в его большой интенсивности излучения. Так, при 12 МэВ интенсивность пучка тормозного излучения от малого микротрона 3000 Р/мин.

В сильноточных ускорителях прямого действия ускоряемые частицы движутся в постоянном электрическом поле, причем их конечная энергия в электрон-вольтах равна электрическому напряжению установки в вольтах. В ускорителях всех типов имеется ускорительная трубка.

Многообразие ускорителей прямого действия обусловлено многообразием типов и систем генераторов высокого напряжения, в качестве которых используют каскадные электрические и роторные генераторы, а также высоковольтные трансформаторы.

Ускорители-трансформаторы наиболее эффективны и экономичны в диапазоне энергий 0,5...5,0 МэВ.

Для промышленного облучения материалов разработан ускоритель, названный капатроном. Источником высокого напряжения в капатроне является каскадный генератор.

**Ускорители заряженных частиц.** Для получения нейтронов используются ядерные реакции под действием заряженных частиц (обычно дейtronов, протонов и  $\alpha$ -частиц), а также фотонейтронные реакции под действием тормозного (рентгеновского) излучения. Эффективное сечение таких реакций зависит от

энергии указанных частиц и электростатического барьера ядра-мишени. Энергетический спектр возникающих нейтронов и их угловое распределение определяются видом и энергией частиц, а также характеристиками облучаемых ядер и толщиной мишени.

При получении нейтронов с помощью ускоренных протонов, дейtronов и  $\alpha$ -частиц в качестве мишеней обычно применяют вещества, имеющие ядра с малым зарядом, такие, как дейтерий, тритий, бериллий и некоторые другие. В случае получения нейтронов в процессе фотоядерных реакций мишенями служат тяжелые металлы (уран, висмут, свинец).

**Радиографические пленки** реагируют на прошедшее через объект излучение. В процессе экспонирования изменяются параметры чувствительного слоя, обеспечивая регистрацию изменения интенсивности излучения. Пленки обладают интегрирующей способностью регистрировать чрезвычайно низкие потоки излучения за длительное время просвечивания в широком диапазоне энергий. Фотографическая эмульсия содержит чувствительную к излучению галоидную соль серебра (обычно бромистое серебро с небольшой примесью йодистого), равномерно в виде зерен распределенную в тонком слое желатина. Эмульсию наносят на подложку (целлюлозу, стекло, бу-

магу и т.д.) с обеих сторон. При облучении пленки проникающим излучением в кристаллах бромистого серебра происходят изменения, благодаря которым кристалл становится способным к проявлению, т.е. восстановлению, металлического серебра под действием проявителя.

Радиографические пленки подразделяют на два класса (табл. 16.2):

- безэкранные, предназначенные для использования без флуоресцентных экранов, или с металлическими усиливающими экранами;

- экранные, рассчитанные на применение с флуоресцентными усиливающими экранами в связи с их высокой чувствительностью к видимой и ультрафиолетовой частями спектра.

Пленка, имеющая плотность почернения  $D$  и рассматриваемая в падающем на нее свете с интенсивностью  $I$ , ослабляет этот свет. Вследствие этого интенсивность прошедшего света  $I_n$  становится  $< I$ . Фотографическая плотность почернения пленки определяется соотношением  $D = \lg I / I_n$ . Кривую зависимости плотности почернения  $D$  пленки от логарифма относительной экспозиции  $\Delta \lg X$  называют характеристической кривой (рис. 16.36). Ее можно разделить на несколько участков:  $AB$  – область недодержек;  $BC$  и  $CD$  – области

## 16.2. Классификация и основные характеристики радиографических пленок

Класс	Группа	Тип пленки			Средний градиент $\gamma$ для $D_{\max} = 1,5 \dots 2,5$	Разрешающая способность $R$ , линий/мм
		PT (Россия)	Kodak (США)	AGFA (Германия)		
Безэкранные пленки	Высоко-контрастные	PT-5, PT-5D	Микротекс	D2	4...4,5	140...180
		PT-4M, РНТМ-1D	Кристаллекс	D4	3,5...4	110...140
	Высоко-чувствительные	PT-3	Индастрекс	D7	3...3,5	80...110
		PT-1, PT-1D	Кодирекс	D10	2,5...3	68...73
Экранные пленки	С флуоресцентными экранами	PT-2	Индастрекс	S	3...3,1	
	Без экранов				2,5...2,8	

**Примечание.**  $D_{\max}$  – максимальная плотность почернения пленки для случая, когда все микрокристаллы бромистого серебра перейдут в металлическое серебро при проявлении;  $D_{\max}$  пропорциональна массе серебра на единице площади пленки, зависит от ее типа и времени проявления  $t_{\text{пр}}$ . Значения  $D_{\max}$  даны для  $t_{\text{пр}} = 10$  мин.

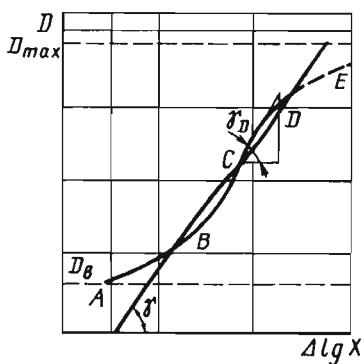


Рис. 16.36. Характеристическая кривая радиографической пленки

нормальных экспозиций;  $DE$  — область перегорок. Область нормальной экспозиции в первом приближении представляет собой прямолинейный участок, для которого справедливо уравнение

$$\Delta D = D - D_0 = \gamma(\lg X - \lg X_0), \quad (16.2)$$

где  $\gamma$  — средний градиент пленки (тангенс угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой);  $X$  и  $X_0$  — экспозиционные дозы, вызывающие почернение пленки  $D$  и  $D_0$  соответственно.

Строго говоря, любая радиографическая пленка подобного прямолинейного участка не имеет. Вследствие этого контрастность пленки (тангенс угла наклона касательной к характеристической кривой) определяется соотношением

$$\gamma_D = dD / D(\lg X). \quad (16.3)$$

Контрастность пленки является функцией плотности почернения и экспозиции, и для пленок различного типа эта зависимость непостоянна (рис. 16.37). Контрастность безэкраных пленок увеличивается с ростом плотности почернения. Именно поэтому наивыгоднейшая плотность почернения пленок этого типа та, при которой можно просмотреть ее на расшифровочном оборудовании. Максимальная контрастность пленок экранного типа соответствует плотности почернения  $D = 1,8 \dots 2,2$ , т.е. лучшую радиографическую чувствительность можно получить именно при этих значениях  $D$ . В данном диапазоне плотностей почернения контрастность пленки  $\gamma_D$  можно принимать равной среднему градиенту  $\gamma$  (см. табл. 16.2).

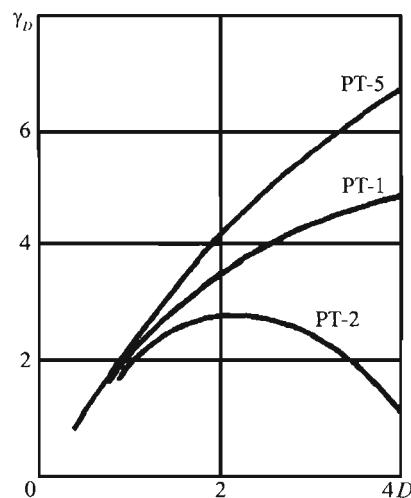


Рис. 16.37. Зависимость контрастности радиографической пленки от плотности почернения

Одной из важнейших характеристик радиографических пленок является разрешающая способность, которая характеризуется числом различных штриховых линий одинаковой толщины на длине 1 мм. Мелкозернистые пленки типа PT-5, PT-4М имеют более высокую разрешающую способность в отличие от крупнозернистых пленок типов PT-3, PT-1 и PT-2 (см. табл. 16.2).

**Усиливающие металлические и флуоресцентные экраны.** Их применяют для сокращения времени просвечивания. Усиливающее действие металлических экранов основано на освобождении из них вторичных электронов под действием ионизирующего излучения. Освобожденные вторичные электроны действуют на эмульсию пленки и вызывают дополнительную фотохимическую реакцию, усиливающую действие первичного излучения. Для каждого источника ионизирующего излучения материал экрана следует выбирать в зависимости от энергии излучения, в частности для рентгеновского излучения целесообразно использовать медь, титан, олово, свинец, вольфрам, для  $\gamma$ -излучения — вольфрам, свинец, медь. Практика показывает, что наибольшую эффективность обеспечивают металлические экраны из медной и титановой фольги. В этом случае получается гораздо лучшая контрастность снимков. Толщина фольги должна быть равна максимальной длине пробега вторичных электронов в экране. На практике толщина экрана

(фольги) 0,05...0,5 мм. Фольга наносится на гибкую пластмассовую подложку.

Металлические экраны рекомендуется использовать с безэкранными радиографическими пленками РТ-1, РТ-3, РТ-4М, РТ-5. При их применении практически не ухудшается разрешающая способность изображения на пленках.

*Усиливающее действие флуоресцентных экранов* определяется действием фотонов видимой, сине-фиолетовой, ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра, высвечиваемых из люминофоров при прохождении через них ионизирующего излучения. В качестве люминофоров используют ZnS, CdS, BaSO<sub>4</sub>, PbSO<sub>4</sub>, CaWO<sub>4</sub> и др.

Флуоресцентные экраны изготавливают в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые наносят слой люминофора. Эти экраны рекомендуется использовать с экранными радиографическими пленками, поскольку спектральная чувствительность эмульсии пленки и спектр свечения экранов хорошо согласуются. При применении флуоресцентных экранов разрешающая способность изображения на пленках существенно ухудшается из-за крупнозернистости экранов.

С помощью флуоресцентных экранов получают меньшие экспозиции (рис. 16.38), а при использовании металлических экранов (рис. 16.39) – лучшую чувствительность.

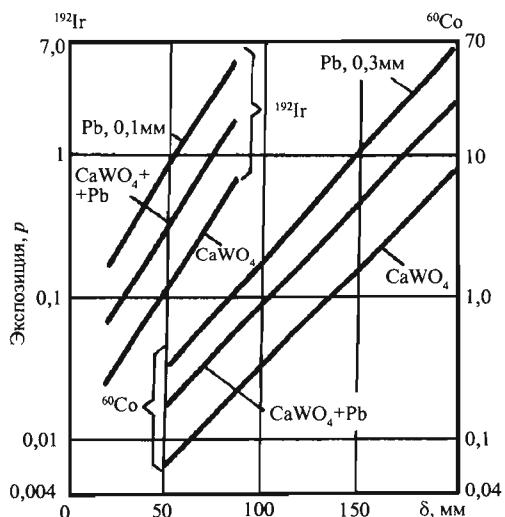


Рис. 16.38. Зависимость экспозиции от толщины стали для различных экранов и источников излучения

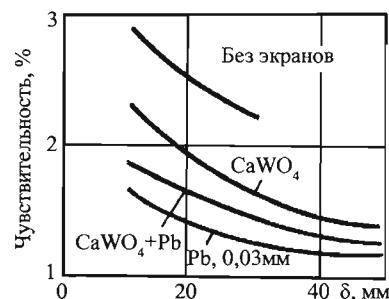


Рис. 16.39. Зависимость относительной чувствительности рентгенографии от толщины стали для различных экранов

При радиографии применяют флуорометаллические усиливающие экраны в виде свинцовой подложки с нанесенным на нее слоем люминофора. Они имеют больший коэффициент усиления, чем металлические, и обеспечивают лучшую чувствительность, чем флуоресцентные экраны.

Усиливающие экраны используют в виде заднего и переднего экранов, между которыми размещены радиографические пленки. При этом увеличивается коэффициент усиления и уменьшается влияние рассеянного излучения на пленку. Толщину металлических экранов, а также материал люминофора и его количество в составе флуоресцентных экранов выбирают в зависимости от типа источника излучения.

Флуоресцентные экраны с малым количеством люминофоров на поверхности применяют с низкоэнергетическими источниками излучения, а экраны с большим количеством люминофора – с высокозернистыми источниками. Ввиду крупнозернистости последних экранов существенно уменьшается разрешающая способность изображения (до 1,5 – 3 раз). Экраны выполняются в виде свинцовой фольги, которая наклеивается на гибкую пластиковую подложку, обеспечивающую их сохранность и хорошее состояние поверхности.

**Эталоны чувствительности.** Для определения относительной чувствительности радиографического контроля используют специальные эталоны. Этalon представляет собой пластину с идеальными дефектами, контуры которых резко очерчены. На границе дефектов эталона резко изменяется суммарная толщина просвечиваемого материала, в то время как в реальном металле – постепенное изменение его толщины на границе дефект – бездефектная

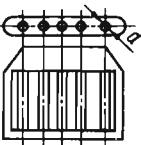
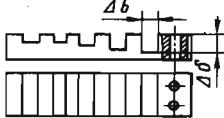
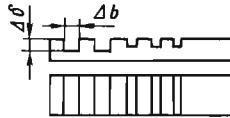
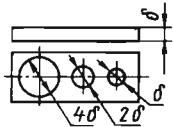
зона. Кроме того, реальные дефекты часто распределены и имеют неправильные очертания. Вследствие этого поры или шлаковые включения, диаметры которых равны соответственно высоте прорези или диаметру проволоки эталона, могут быть не выявлены несмотря на то, что изображения искусственных дефектов четко видны.

В практике радиационной дефектоскопии применяют несколько типов эталонов чувствительности (табл. 16.3). Чаще других используют канавочные и проволочные эталоны четырех типоразмеров каждый. На канавочном эталоне имеется шесть канавок, глубина рядом расположенных канавок различается в 1,39 раза. Проволочный эталон представляет собой пластиковый чехол с семью проволоками различного диаметра, соседние проволоки различаются размерами в 1,25 раза. Материал эталона дол-

жен быть аналогичен материалу контролируемого изделия. Этalonы маркируют свинцовыми буквами и цифрами. Буквы обозначают материал эталона, цифры – его номер, например Cu2, Fe1, Al3, Ti4. Оба вида эталона равнозначны по чувствительности, выбор их определяется условиями работы и удобством использования.

**Кассеты, маркировочные знаки и держатели.** Перед радиографическим контролем пленку вместе с усиливающими экранами помещают в специальную светозащитную кассету. В практике промышленной радиографии применяют гибкие и реже жесткие кассеты. Преимущественное использование гибких кассет обусловлено тем, что они обеспечивают плотное прилегание к контролируемой поверхности сложной конфигурации. Гибкая кассета представляет собой двойной конверт из черной

### 16.3. Этalonы чувствительности

Тип эталона	Эскиз	Чувствительность (в %) для $\delta = 10 \dots 50$ мм	Стандарты
Проволочный <sup>1</sup>		1	Европейских стран, Великобритании, Японии
Канавочный с канавками постоянной ширины и переменной глубины <sup>2</sup>		0,5	Европейских стран
Канавочный с канавками переменных ширины и глубины		1	РФ
Пластинчатый с отверстиями		1,5...2,0	США, ASME Code, РФ
Ступенчатый с отверстиями		2,0...2,5	Международного института сварки (МИС)

<sup>1</sup> Геометрический ряд значений  $d$  с основанием 1,25.

<sup>2</sup> Арифметический ряд значений  $\Delta d$ .

светонепроницаемой бумаги или дерматина. В меньший конверт укладывают пленку с усиливающими экранами, а затем заряженный конверт вставляют в другой конверт, имеющий большие размеры, обеспечивая тем самым светонепроницаемость кассеты. В кассетах предусмотрены карманы для установки маркировочных знаков и эталонов чувствительности. Недостатком гибких кассет является отсутствие полной гарантии плотности прижатия пленки к усиливающим экранам. Этого недостатка лишены жесткие кассеты, выполненные из алюминиевых сплавов и пластмасс, но их можно применять только при контроле изделий простой формы, когда не требуется изгибать пленку.

Наиболее качественное прилегание усиливающих экранов к радиографической пленке обеспечивают вакуумные кассеты. Они имеют герметичный корпус. При откачивании воздуха из внутреннего объема кассеты плотный контакт между пленкой и экранами достигается благодаря действию атмосферного давления. Эти кассеты применяют крайне редко из-за их дороговизны и сложности использования. В зависимости от типа просвечиваемого изделия и главным образом интенсивности ионизирующего излучения применяют различные схемы зарядки радиографических кассет (см. рис. 16.39). Например, зарядку кассеты по схемам, приведенным на рис. 16.40, *а*, *д*, рекомендуют для просвечивания стальных изделий толщиной до 4 мм; по схемам, приведенным на рис. 16.40, *б*, *в* – для просвечивания стали толщиной >4 мм; по схемам, показанным на рис. 16.40, *г* и *з*, – для контроля изделий толщиной >100 мм.

Зарядку кассет двумя пленками по схемам, изображенным на рис. 16.40, *е* – *ж*, осуществляют при контроле особо ответственных изделий и изделий переменной толщины. В последнем случае в кассету вкладывают две пленки различной чувствительности.

С целью обозначения изделий по участкам контроля применяют маркировочные свинцовые знаки, которые размещают в кассете. После просвечивания их изображения отпечатываются на снимке. Гибкие кассеты, заряженные радиографической пленкой и экранами, устанавливают на ферромагнитных материалах магнитными держателями типа МД-1. На немагнитных материалах кассеты крепят резиновыми поясами и ремнями. Иногда применяют специальные пояса, снабженные застежками и натяжными ремнями.

#### 16.3.4. ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

**Основные параметры.** Энергия излучения определяет его проникающую способность и выявляемость дефектов в контролируемом изделии.

От *мощности Р экспозиционной дозы* излучения зависят производительность контроля, а также требования техники безопасности.

*Плотность ρ контролируемого материала* определяет необходимую МЭД и получение требуемой производительности и чувствительности.

*Линейный коэффициент ослабления μ<sub>0</sub>* излучения в материале свидетельствует о проникающих свойствах излучения и выявляемости дефектов.

*Дозовый фактор накопления β* характеризует рассеяние излучения в материале изделия в зависимости от линейного коэффициента ослабления μ<sub>0</sub> и толщины контролируемого изделия δ и оказывает заметное влияние на выявляемость дефектов. Он зависит от отношения суммы интенсивностей нерассеянного и рассеянного излучений к интенсивности нерассеянного излучения:  $\beta = (I_h + I_p) / I_h$ .

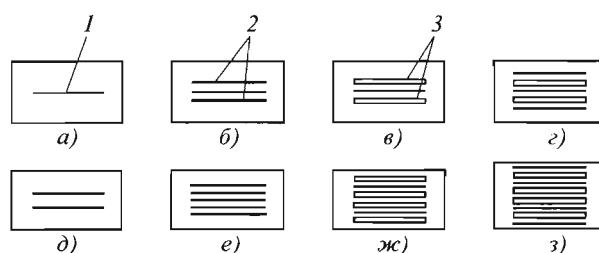


Рис. 16.40. Способы зарядки кассет:  
*1* – радиографическая пленка; *2* – усиливающий металлический экран;  
*3* – усиливающий флуоресцирующий экран

*Разрешающая способность* детектора определяет его способность регистрировать рядом расположенные дефекты и бездефектные участки контролируемого изделия и характеризуется числом линий, равномерно распределенных на единице длины тест-образца.

*Абсолютная чувствительность*  $W_{\text{abs}}$  (в мм) говорит о размере минимально выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности.

*Относительная чувствительность*  $W_{\text{отн}}$  (в %) определяется отношением размера  $\Delta\delta$  минимально выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности к толщине контролируемого изделия  $\delta$ . Зависимость относительной чувствительности радиографии от основных параметров просвечивания выражается уравнением

$$W_{\text{отн}} = \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{2,3\Delta D_{\min} B}{\mu_0 \gamma_D \delta} 100\%, \quad (16.4)$$

где  $\Delta D_{\min}$  – минимальная разность плотностей пачернения различаемая глазом;  $B$  – дозовый фактор накопления;  $\gamma_D$  – контрастность радиографической пленки.

На практике значение  $\Delta D_{\min} \approx 0,006\dots 0,01$ . Значения  $\gamma_D$ ,  $B$  и  $\mu_0$  известны из литературы.

Помимо указанных факторов чувствительность радиографического контроля зависит также от: формы и места расположения дефекта, величины фокусного расстояния, фокусного пятна трубы, типа рентгеновской пленки.

**Техника контроля.** Ввиду сложности процессов ослабления энергии рентгеновского

и  $\gamma$ -излучений при прохождении их через контролируемый металл и многообразия перечисленных факторов учесть одновременное воздействие их на чувствительность метода не представляется возможным. Целесообразно рассмотреть эти факторы в отдельности, оценивая влияние каждого из них на чувствительность метода к выявлению дефектов.

**Энергия излучения.** Из формулы (16.4) видно, что чем больше линейный коэффициент ослабления  $\mu_0$ , тем меньше размер дефекта, который удается обнаружить. В свою очередь, коэффициент  $\mu_0$  зависит от энергии излучения источника. Получение рентгеновского излучения той или иной энергии достигается регулированием напряжения на рентгеновской трубке, энергия  $\gamma$ -излучения обусловлена выбором соответствующего радиоактивного изотопа. Влияние энергии рентгеновского и  $\gamma$ -излучений на чувствительность контроля показано на рис. 16.41. Как видно из графиков, чувствительность контроля стали одинаковой толщины тем выше, чем меньше энергия излучения.

Рассеянное излучение в зависимости от энергии первичного излучения изменяет качество снимка, снижает контрастность и четкость изображения, а следовательно, и чувствительность самого метода. При отсутствии рассеяния дефект на пленке будет изображаться с четкими границами (рис. 16.42). Однако практически всегда имеет место рассеяние излучения, нарушающее четкость изображения. Вследствие этого дефекты малого размера становятся трудноразличимыми (размыты границы изображения) и часто могут быть не выявлены.

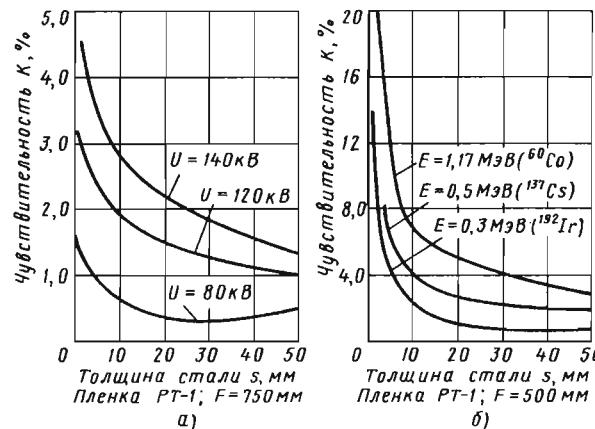


Рис. 16.41. Зависимость чувствительности радиографического контроля от энергии излучения:  
а – рентгеновского аппарата РУП-150-10; б – изотопов;  $F$  – фокусное расстояние

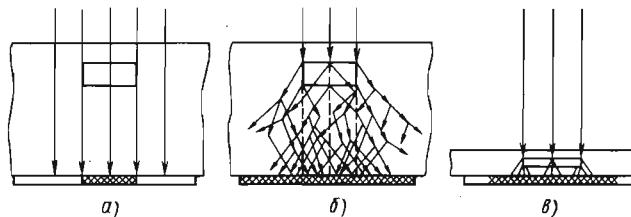


Рис. 16.42. Влияние рассеянного излучения на контрастность изображения при просвечивании:  
а – при параллельном нерассеянном пучке излучения;  
б – ухудшение контрастности от рассеянного излучения при просвечивании изделий большой толщины;  
в – улучшение контрастности при просвечивании изделий малой толщины тем же пучком излучения

Рассеяние излучения всегда сильнее в толстостенных материалах (см. рис. 16.42, б), чем в тонкостенных, поэтому чувствительность метода значительно ухудшается с увеличением толщины просвечиваемого материала. Совершенно избавиться от рассеяния излучения нельзя. Уменьшить его можно специальными фильтрами, представляющими собой тонкий слой оловянной (0,025 мм) или свинцовой (0,075...0,15 мм) фольги, расположенной либо между источником и контролируемым объектом, либо между пленкой и объектом. Рассеяние излучения можно уменьшить также, сократив площадь облучения. Последнее достигается либо при помощи диафрагмы, помещаемой у источника излучения, либо посредством свинцовой маски с отверстием, помещаемой над просвечиваемым объектом. Рассеяние уменьшается, если увеличить расстояние от контролируемого объекта до пленки.

**Толщина материала.** Чувствительность более сложным образом зависит от толщины контролируемого материала (рис. 16.43). Вначале чувствительность возрастает вследствие того, что с увеличением толщины материала убывает эффективный коэффициент ослабления. Мягкие составляющие излучения ослабляются сильнее, чем жесткие, и в последующие слои попадает излучение, уже частично отфильтрованное в предыдущих слоях. По мере прохождения через вещество излучение становится все более жестким и при этом одновременно замедляется убывание коэффициента эффективного ослабления: он приближается к постоянному значению. Для сравнительно больших толщин подъем кривой (ухудшение чувствительности) объясняется эффектом рассеяния. В итоге ухудшение чувствительности из-за наличия рассеянного излучения определяет предел применяемости всего метода просвечивания материалов до определенной толщины (100...150 мм).

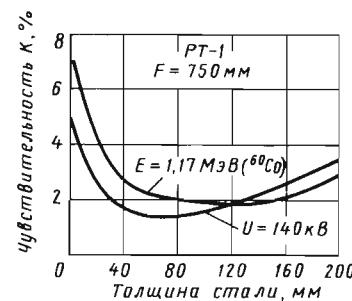


Рис. 16.43. Зависимость чувствительности радиографического контроля от толщины контролируемого соединения

**Форма дефектов и их ориентация в шве.** Дефекты (непровары) с прямолинейными гранями, ориентированные параллельно направлению распространения излучения, выявляются значительно лучше из-за большой резкости изображения их границ (рис. 16.44, а), чем дефекты цилиндрической (шлаковые включения), или шаровой (поры), или другой формы (см. рис. 16.44, б, в). Действительно, непровар, как правило, имеет постоянную высоту  $\Delta s$  по сечению падающего пучка излучения, тогда как у объемных дефектов она переменная, поэтому плотность потемнения изображения в этом случае будет постепенно и равномерно снижаться от максимума, определяемого диаметром дефекта, до плотности потемнения всего поля пленки. Вследствие этого резкость изображения отсутствует, а следовательно, и контрастность снимка, воспринимаемая глазом, значительно ухудшается.

Наилучшая выявляемость наблюдается при прохождении излучения вдоль дефектов, т.е. когда угол  $\alpha$  (рис. 16.45) равен  $0^\circ$ . При ориентации дефекта под некоторым углом к направлению излучения выявляемость ухудшается; в этом случае пучок излучения будет

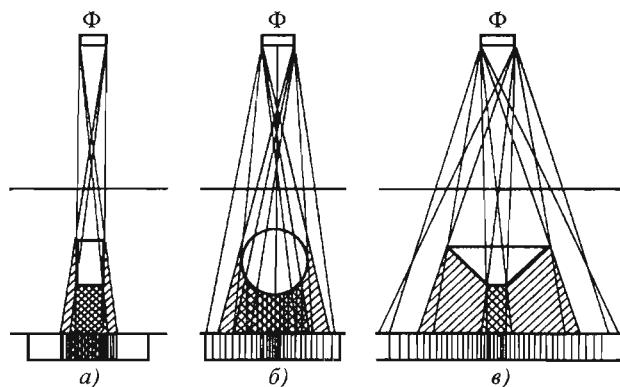


Рис. 16.44. Влияние формы  $\Phi$  дефекта на контрастность его изображения:  
а – прямоугольной; б – шаровой; в – трапецидальной

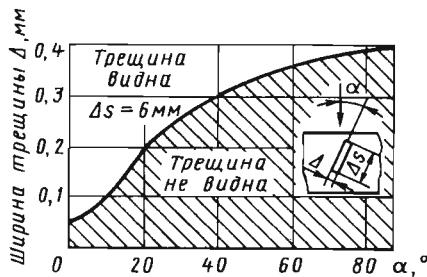


Рис. 16.45. Выявляемость трещины в зависимости от ориентации ее к направлению излучения

проходит не всю высоту  $\Delta s$ , а только определенную ее часть. Чувствительность просвечивания при этом будет определяться шириной раскрытия дефекта  $\Delta$ . В практике очень часто встречаются дефекты, у которых ширина раскрытия  $\Delta$  незначительна при достаточно большой высоте  $\Delta s$ . В этом случае на пленке проекция изображения дефекта не будет видна из-за малой разницы в плотностях потемнения пленки в дефектном и бездефектном месте. К подобным дефектам относят, например, трещины, стянутые непровары, несплавления по кромкам. Вероятность выявления подобных дефектов очень мала (35...40 %). Расслоения в прокатанных листах, расположенные параллельно поверхности листов, как правило, просвечиванием не выявляются. По этой же причине слабо обнаруживаются несплавления по катетам шва в тавровых, угловых и нахлесточных соединениях.

**Фокусное расстояние.** Увеличение фокусного расстояния (рис. 16.46) аналогично энергии ослабления излучения делает его более

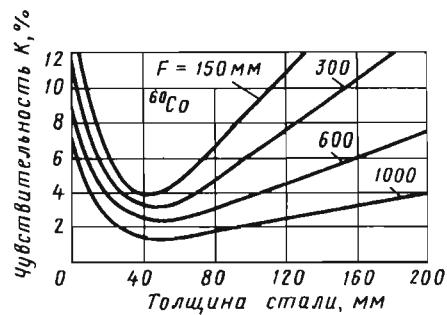


Рис. 16.46. Чувствительность при просвечивании стали  $\gamma$ -излучением на различных фокусных расстояниях

мягким, вследствие чего улучшается чувствительность контроля. Следует заметить, что фокусное расстояние  $F$  связано с временем просвечивания  $t$  следующим соотношением:  $t / t_0 = (F / F_0)^2$ , где  $t$  – время просвечивания при выбранном фокусном расстоянии, см;  $t_0$  – время просвечивания при фокусном расстоянии  $F_0$ , взятое по номограмме (см. рис. 16.46). Из соотношения видно, что при увеличении фокусного расстояния резко возрастает время просвечивания. Чем меньше размер фокуса, тем более четкий рельеф изображения дефекта на снимке, тем меньше область полутени, тем выше чувствительность контроля (рис. 16.47).

**Усиливающие экраны.** Из рис. 16.48 видно, что применение металлических экранов обеспечивает некоторое повышение чувствительности, обусловленное уменьшением воздействия вторичного излучения, источником

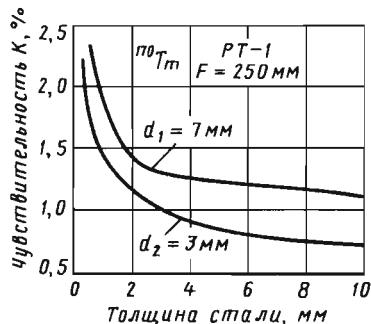


Рис. 16.47. Влияние размера фокуса  $d$  на чувствительность контроля

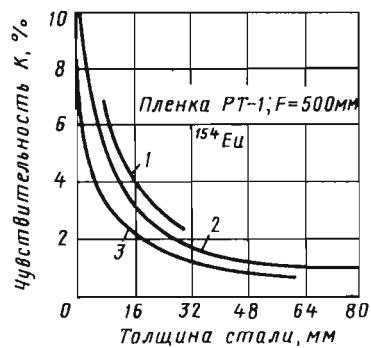


Рис. 16.48. Влияние усиливающих экранов на чувствительность радиографического метода при просвечивании стали  $\gamma$ -излучением  $^{154}\text{Eu}$ : 1 – флуоресковидные экраны; 2 – без экранов; 3 – металлические экраны (свинец 0,1 мм)

которого является сам контролируемый материал. Рассеянное вторичное излучение уменьшает резкость и контрастность изображения объекта. Рассеянное излучение от тяжелых элементов, подобно свинцу, сравнительно невелико, они выполняют роль своеобразного фильтра, особенно для первичного излучения низких энергий.

**Тип пленки.** В зависимости от типа пленки, обусловленного размером зерна и реакции к излучению, чувствительность радиографического контроля при прочих равных условиях (энергия излучения, род и толщина материала) может изменяться от 0,5 (РТ-5) до 3 % (РТ). Пленки, обеспечивающие лучшую чувствительность, имеют мелкозернистую структуру и слабую реакцию к излучению, но требуют большего времени для просвечивания.

С учетом изложенных факторов, влияющих на чувствительность контроля, кратко

рассмотрим операции радиографического контроля на примере сварных соединений.

При радиографировании изделий соблюдают такую последовательность выполнения основных операций: выбирают источник излучения, радиографическую пленку и определяют оптимальные режимы просвечивания; просвечивают объект; проводят фотообработку снимков и их расшифровку; оформляют результаты контроля.

**Выбор источника излучения** обусловливается технической целесообразностью и экономической эффективностью. Основными факторами, определяющими выбор источника, являются: заданная чувствительность; плотность и толщина материала контролируемого изделия; производительность контроля; конфигурация контролируемой детали; доступность ее для контроля и др.

Например, при контроле изделий, в которых допускаются дефекты большого размера, наиболее целесообразно применять изотопы с высокой энергией, обеспечивающие малое время просвечивания. Для изделий ответственного назначения используют рентгеновское излучение и только как исключение – изотопы, имеющие по возможности наименьшую энергию излучения.

**Выбор радиографической пленки** осуществляется по толщине и плотности материала просвечиваемого объекта, а также по требуемой производительности и заданной чувствительности контроля.

Пленку РТ-1 используют главным образом для контроля сварных соединений больших толщин, так как она обладает высокими контрастностью и чувствительностью к излучению. Универсальную экранную пленку РТ-2 применяют при просвечивании деталей различной толщины, при этом время просвечивания по сравнению с другими типами пленок наименьшее. Для контроля изделий из алюминиевых сплавов и сплавов черных металлов небольшой толщины годится высококонтрастная пленка РТ-3 и РТ-4. При дефектоскопии ответственных соединений применяют пленку РТ-5. Эта пленка обладает весьма высокой контрастностью, позволяет выявлять незначительные дефекты, хотя и имеет наименьшую чувствительность к излучению, что и увеличивает время экспозиции при контроле. Ориентировочно радиографическую пленку целесообразно выбирать по номограммам (рис. 16.49).

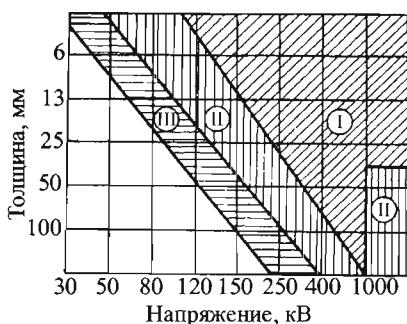


Рис. 16.49. Номограммы областей применения радиографических пленок при просвечивании стали:

I – PT-5, PT-4; II – PT-1, PT-3; III – PT-2

Для контроля сварных соединений различных типов выбирают одну из схем просвечивания, приведенных на рис. 16.50. Стыковые односторонние соединения без разделки кромок, а также с V-образной разделкой просвечивают, как правило, по нормали к плоскости свариваемых элементов (см. рис. 16.50, схема 1). Швы, выполненные двусторонней сваркой с К-образной разделкой кромок, наиболее целесообразно просвечивать по схеме 2 с применением в ряде случаев двух экспозиций. В этом случае направление центрального луча должно совпадать с линией разделки кромок. Допускается просвечивать эти швы также и по схеме 1.

При контроле швов нахлесточных, угловых и тавровых соединений центральный луч направляют, как правило, под углом  $45^\circ$  к плоскости листа (схемы 3 – 8). Трубы большого диаметра ( $>200$  мм) просвечивают через одну стенку, а источник излучения устанавливают снаружи или внутри изделия с направлением оси рабочего пучка перпендикулярно к шву (схемы 9, 11).

При просвечивании через две стеки сварных соединений труб малого диаметра, чтобы избежать наложения изображения участка шва, обращенного к источнику излучения, на изображение участка шва, обращенного к пленке, источник сдвигают от плоскости сварного соединения (схема 10) на угол до  $20\ldots25^\circ$ .

При выборе схемы просвечивания необходимо помнить, что непровары и трещины могут быть выявлены лишь в том случае, если плоскости их раскрытия близки к направлению просвечивания ( $0\ldots10^\circ$ ), а их раскрытие  $\geq 0,05$  мм.

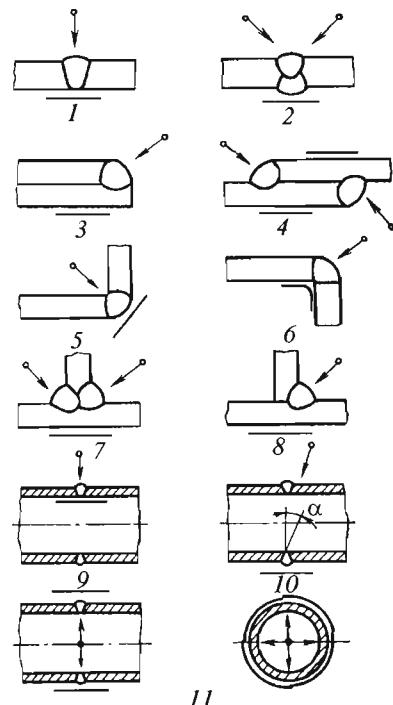


Рис. 16.50. Схемы контроля сварных соединений

При контроле кольцевых сварных соединений трубы часто применяют панорамную схему просвечивания (схема 11), при которой источник с панорамным излучением устанавливают внутри трубы на оси и соединение просвечивают за одну экспозицию. Условие применения этой схемы просвечивания следующее: размер активной части  $\Phi$  источника излучения, при котором возможно его использование для контроля сварного шва панорамным способом, определяют по формуле

$$\Phi \leq (u - R) / (r - 1),$$

где  $u$  – максимально допустимая величина геометрической нерезкости изображения дефектов на снимке, задаваемая, как правило, действующей документацией на контроль, мм;  $R$  и  $r$  – внешний и внутренний радиусы контролируемого соединения соответственно, мм.

После выбора схемы просвечивания устанавливают величину *фокусного расстояния*  $F$ . С его увеличением чувствительность метода, но возрастает (пропорционально квадрату расстояния) время экспозиции.

Фокусное расстояние выбирают в зависимости от схемы просвечивания, толщины материала и размеров активной части (фокусного пятна) источника излучения. Например, для схем 1 – 8 (см. рис. 16.50) фокусное расстояние должно быть  $F \geq (\Phi / u + 1)(s + H)$ , где  $s$  – толщина сварного соединения в направлении просвечивания, мм;  $H$  – расстояние от пленки до обращенной к ней поверхности изделия. Обычно фокусное расстояние выбирают в диапазоне 300...750 мм.

**Время экспозиции** и **длина** контролируемого за одну экспозицию участка при контроле по приведенным схемам должны быть такими, чтобы:

- плотность погружения изображения контролируемого участка шва, ОШЗ и эталонов чувствительности была  $\geq 1,0$  и  $\leq 3,0$  ед. оптической плотности;
- уменьшение плотности погружения любого участка сварного шва на снимке по сравнению с плотностью погружения в месте установки эталона чувствительности было

$\leq 0,4\dots0,6$  ед. оптической плотности в зависимости от коэффициента контрастности пленки, но нигде плотность погружения не должна быть  $<1,5$  ед.;

– искажение изображения дефектов на краях снимка по отношению к изображению их в его центре не превышало 10 и 25 % для прямы и криволинейных участков соответственно.

Обычно длина  $l$  прямолинейных и близких к прямолинейным участков, контролируемых за одну экспозицию, должна быть  $\leq 0,8f$ , где  $f$  – расстояние от источника излучения до поверхности контролируемого участка.

**Подбор экспозиции** при просвечивании изделий проводят по номограммам (рис. 16.51), а уточняют ее с помощью пробных снимков. Экспозиция рентгеновского излучения выражается как произведение тока трубки на время;  $\gamma$ -излучения – как произведение активности источника излучения, выраженной в  $\gamma$ -эквиваленте радия, на время. Номограммы даются для определенных типа пленки, фокусного расстояния и источника излучения.

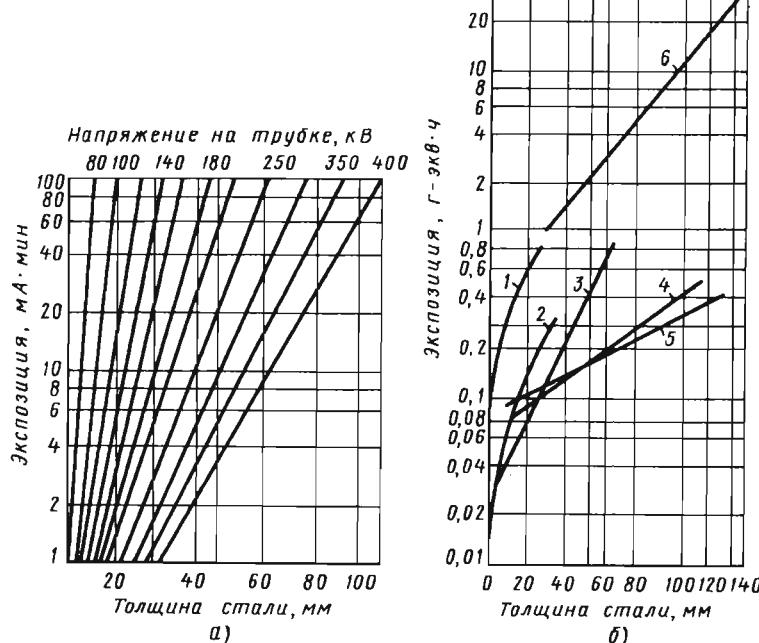


Рис. 16.51. Номограммы для определения времени экспозиции просвечивания стали:

а – рентгеновским излучением при  $F = 750$  мм и пленке РТ-1; б –  $\gamma$ -излучением при пленке РТ-1 и  $F = 500$  мм;  
1 – титий; 2 – стронций-75; 3 – иридий-192; 4 – цезий-135; 5 – европий-152; 6 – кобальт-60

**Подготовка контролируемого объекта к просвечиванию** заключается в тщательном осмотре и при необходимости в очистке объекта от шлака и других загрязнений. Наружные дефекты необходимо удалить, так как их изображение на снимках может затемнить изображение внутренних дефектов. Сварное соединение разбивают на участки контроля, которые маркируют с тем, чтобы после просвечивания можно было точно указать расположение выявленных внутренних дефектов. Кассеты и радиографические пленки, заряженные в них, должны маркироваться в том же порядке, что и соответствующие участки контроля. Выбранную пленку заряжают в кассету, после чего кассету укрепляют на изделии, а со стороны источника излучения устанавливают эталон чувствительности. В тех случаях, когда его невозможно так разместить, например, при просвечивании труб через две стенки, разрешается располагать эталон со стороны детектора (кассеты с пленкой).

После выполнения перечисленных операций и обеспечения безопасных условий работы приступают к просвечиванию изделий. При этом источник излучения необходимо установить таким образом, чтобы во время просвечивания он не мог выбрировать или сдвинуться с места, иначе, изображение на пленке окажется размытым. По истечении времени просвечивания кассеты с пленкой снимают и экспонированную пленку подвергают фотообработке.

Процесс **фотообработки** пленки включает в себя следующие операции: проявление, промежуточную промывку, фиксирование изображения, промывку в непроточной воде, окончательную промывку и сушку пленки. При проявлении кристаллы бромистого серебра восстанавливаются в металлическое серебро. Пленку проявляют в специальном растворе — проявителе. Время проявления указано на упаковках пленки и раствора. После проявления пленку ополаскивают в кювете с водой. Такая промежуточная промывка предотвращает попадание проявителя в фиксирующий раствор — фиксаж. В фиксаже растворяются непроявленные зерна бромистого серебра, а восстановленное металлическое серебро не претерпевает изменений.

После фиксирования пленку необходимо промыть в непроточной воде с последующим извлечением и сбором серебра. Затем пленку промывают в ванне с проточной водой в течение 20...30 мин для удаления оставшихся по-

сле фиксирования химических реагентов. После промывки пленки ее сушат 3...4 ч. Температура сушки не должна превышать 35 °С.

**Расшифровка снимков** — наиболее ответственный этап фотообработки. Задача расшифровщика заключается в выявлении дефектов, установлении их видов и размеров. Рентгенограммы расшифровываются в проходящем свете на неготоскопе — устройстве, в котором имеются закрытые молочным или матовым стеклом осветительные лампы для создания равномерно рассеянного светового потока. Помещение для расшифровки затемняют, чтобы поверхность пленки не отражала падающий свет. Современные неготоскопы регулируют яркость освещенного поля и его размеры. Если освещенность неготоскопа не регулируется, то при слишком ярком свете могут быть пропущены мелкие дефекты с незначительными изменениями оптической плотности покернения пленки.

Расшифровка рентгенограмм состоит из трех основных этапов: оценки качества изображения, анализа изображения и отыскания на нем дефектов; составления заключения о качестве изделия. Качество изображения в первую очередь оценивают по отсутствию на нем дефектов, вызванных неправильной фотообработкой или неаккуратным обращением с пленкой: радиограмма не должна иметь пятен, полос, загрязнений и повреждений эмульсионного слоя, затрудняющих расшифровку.

Затем оценивают оптическую плотность, которая должна составлять 2,0...3; проверяют, видны ли элементы эталона чувствительности, гарантирующие выявление недопустимых дефектов; есть ли на снимке изображение маркировочных знаков. Оптическую плотность измеряют на денситометрах или на микрофотометрах.

Заключение о качестве проконтролированного сварного соединениядается в соответствии с техническими условиями на изготовление и приемку изделия. При этом качество изделия оценивают только по сухому снимку, если он отвечает следующим требованиям:

- на рентгенограмме четко видно изображение сварного соединения по всей длине снимка;
- на снимке нет пятен, царапин, отпечатков пальцев, потеков от плохой промывки пленки и неправильного обращения с ней;
- на снимке видны изображения эталонов. В противном случае проводят повторное просвечивание.

Для сокращения записи результатов контроля применяют сокращенные обозначения обнаруженных на снимке дефектов: Т – трещины; Н – непровар; П – поры; Ш – шлаковые включения; В – вольфрамовые включения; Пдр – подрез; Скр – смещение кромок; О – оксидные включения в шве. По характеру расположения обнаруженные дефекты объединяют в следующие группы: отдельные дефекты, цепочки дефектов, скопление дефектов. К цепочке относят расположенные на одной линии дефекты числом  $\geq 3$  с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефекта или меньше. К скоплению дефектов относят кучно расположенные дефекты в количестве не менее трех с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефекта или меньше. Размером дефекта считают наибольший линейный размер изображения его на снимке в миллиметрах. При наличии группы дефектов разных размеров одного вида указывают средний или преобладающий размер дефекта в группе, а также общее число дефектов.

**Ксерорадиография.** Этот метод контроля представляет собой процесс получения изображения на поверхности пластины, электрические свойства которой изменяются в соответствии с энергией воспринятого рентгеновского или  $\gamma$ -излучения. Если зарядить такую пластину электрическим зарядом до определенного уровня, а затем подвергнуть ионизационному облучению, то величина остаточного заряда на любом участке пластины будет однозначно связана с интенсивностью излучения, падающего на данный участок. При этом остаточный заряд будет тем меньше, чем больше интенсивность излучения. Следовательно, в тех местах пластины, на которые попало излучение, прошедшее через какой-либо дефект (непровар, пора, раковина), остаточный заряд будет меньше, чем в других местах пластины. Таким образом, в пластине образуется скрытое изображение, которое проявляют при помощи различных красящих мелкоразмолотых порошков на основе талька, оксида цинка, мела. Порошок предварительно электризуют и опыляют им пластину, при этом скрытое изображение превращается в видимое. Затем на пластину накладывают обычную бумагу, на которой фиксируется полученное изображение объекта. Весь процесс проявления занимает 30...40 с. Пластина состоит из подложки (алюминий, латунь, стальная фольга) поверху которой нанесен слой полупроводника (селен, оксид цин-

ка, сера, сульфид кадмия и др.). Чаще всего в качестве подложки применяют алюминий, а полупроводником является аморфный селен.

Чтобы ксерографические пластины оказались чувствительными к воздействию излучения, их необходимо предварительно зарядить коронным разрядом при напряжении 7...12 кВ. Длительность зарядки составляет 10...20 с. К заряженной пластине нельзя прикасаться пальцами и любыми другими предметами, так как это приводит к отводу электрического заряда с поверхности и появлению пятен на проявленном изображении. Кроме того, под действием видимого света заряд будет утекать через металлическую подложку. Поэтому ксерографические пластины помещают в кассеты. Заряд пластины при хранении ее в темном месте сохраняется  $\leq 60$  мин. Время между окончанием просвечивания и началом проявления не должно превышать 1...2 ч.

Продолжительность экспозиции при просвечивании изделий рентгеновским или  $\gamma$ -излучением на ксерографические пластины зависит от: энергии и интенсивности излучения, толщины и плотности просвечиваемого материала, фокусного расстояния, чувствительности применяемой ксерографической пластины к излучению данной энергии. Продолжительность экспозиции зависит также от толщины селенового слоя и величины заряда пластины. При одинаковых условиях просвечивания продолжительность экспозиции на ксерографические пластины при энергии излучения 100...400 кэВ меньше в 2 – 4 раза, чем на рентгеновскую пленку, различие тем больше, чем ниже энергия излучения.

В широком диапазоне энергий (от 50 кэВ до нескольких мегаэлектрон-вольт) плотность и контрастность ксерографических отпечатков уменьшается с повышением энергии излучения. При просвечивании изделий на ксерографические пластины целесообразно помещать усиливающие экраны, представляющие собой слой тяжелых металлов (свинец, олово), которые располагают между подложкой и слоем селена. Их применение позволяет увеличить контрастность и четкость изображения. Особенно эффективны свинцовые экраны в случае просвечивания изделий жестким рентгеновским и  $\gamma$ -излучениями. Применять обычные флуоресцирующие экраны в этом случае нецелесообразно, так как из-за крупнозернистости флуоресцирующего слоя и невозможности создать тесный контакт между флуоресци-

рующим экраном и чувствительным слоем заряженной пластины (прикосновение к заряженной пластине отводит заряд с ее поверхности) сильно снижается четкость изображения.

Чувствительность ксерографического метода контроля зависит от энергии излучения, степени ослабления излучения в материале, разрешающей способности пластин и процесса проявления (свойств проявляющего порошка и метода его нанесения). Практически разрешающая способность ксерографической пластины 8...12 линий/мм и зависит от размера частиц проявляющего порошка. Практика показывает, что чувствительность  $K$  ксерографического метода несколько ниже радиографического на рентгеновскую пленку.

К преимуществам ксерографического метода относят оперативность получения снимка и сухой метод проявления. Методом фотосъемки с одной ксерограммы можно сделать высококачественные фотографии с большим числом копий.

При ксерографии отпадает необходимость в дефицитных материалах и процессах фотообработки. Стоимость контроля по сравнению с радиографическим снижается в 6–7 раз.

Однако ксерография имеет ряд недостатков, что сдерживает ее массовое применение в промышленности. Прежде всего это низкое качество пластин, трудность контроля больших изделий из-за ограниченных размеров пластин, возможность использования только плоских пластин. У выпускаемых промышленностью пластин наблюдаются существенные поверхностные дефекты (сетка трещин, царапины), которые резко снижают чувствительность метода. Кроме того, из-за неравномерной толщины покрытия селенового слоя для каждой пластины необходимо подбирать собственный режим просвечивания и проявления. Непостоянная толщина покрытия приводит к неравномерному распределению потенциала по поверхности пластины, что в дальнейшем сказывается на качестве переноса изображения. Пластины подвержены влиянию влажности и низкой температуры. Однако отмеченные недостатки не могут служить препятствием для развития ксерографического метода контроля, так как все они вызваны несовершенством технологии изготовления ксерографических пластин и легко устранимы при серийном производстве.

**Флюорография.** Этот метод контроля заключается в регистрации рентгеновского или  $\gamma$ -излучения на фотобумагу или фотопленку,

содержащих в 7–9 раз меньше серебра, чем рентгеновская пленка. Необходимым условием является обязательное сочетание фотобумаги или фотопленки и усиливающих флуоресцентных экранов. Ионизирующее излучение падает вначале на экран с флуоресцентным слоем для формирования оптического изображения, которое фиксируется на фотобумаге, контактирующей с флуоресцентным экраном.

В зависимости от энергии ионизирующего излучения применяют определенную комбинацию фоторегистратора и усиливающего экрана, при которой достигается наилучшая чувствительность. Необходимо, чтобы основные характеристики (разрешающая способность, максимум спектра поглощения и выравнивания и др.) с фоторегистратора и экранов были достаточно близки по значениям. Практикой установлено, что при энергии излучения до 240 кэВ целесообразно использовать флуорографическую пленку РФ-У (или РФ-3) совместно с экраном из CsI (Tl). Фотобумага «Фототелеграфная БС» и фотопленка «Микрат-300» хорошо сочетается с экранами, имеющими люминофоры из CaWO<sub>4</sub>, CsI (Tl) и NaI (Tl). Для энергии излучения от 240 кэВ до 8 МэВ оптимальна комбинация флуорографической пленки РФ-У с люминесцентным усиливающим экраном из CsI (Tl).

Не менее важным фактором, определяющим условия контроля (максимальную чувствительность, минимальное время экспозиции), является тип источника ионизирующего излучения. Практикой установлено, что максимальная чувствительность ( $K = 1\ldots3\%$ ) достигается в случае просвечивания стали толщиной 5...50 мм рентгеновскими аппаратами, а толщиной 50...250 мм – линейными ускорителями. При необходимости удовлетворительные данные по чувствительности ( $K = 2\ldots4,5\%$ ) в диапазоне толщин 15...70 мм и 70...130 мм можно получить с применением гаммаизотопов <sup>192</sup>Ig и <sup>60</sup>Co соответственно. Указанная чувствительность достигается при фокусном расстоянии  $F = 500\ldots750$  мм. При  $F = 250$  мм чувствительность контроля будет в 2 раза хуже.

**Цветовая радиография.** Обычный черно-белый рентгеновский снимок содержит только один оценочный параметр – яркость серого оттенка. Цветное изображение в отличие от черно-белого позволяет получить два добавочных параметра: цвет и насыщенность. Благодаря этому увеличивается информативная способность радиографического снимка.

Для получения цветного изображения с помощью черно-белой фотопленки делают два или три снимка контролируемого объекта рентгеновским излучением различных энергий и интенсивности (к о с в е н н ы й м е т о д ). При этом экспонируют поочередно каждую пленку или одновременно все пленки с использованием фильтров для селекции рентгеновского излучения. В результате изменения эффективной энергии рентгеновского излучения изображения на каждой пленке отличаются друг от друга. Затем черно-белые негативы окрашивают, например первый снимок в красный цвет, второй в зеленый, третий в синий, и составляют вместе. Полученное цветное изображение расшифровывают на неготоскопе. Оператор воспринимает больше оттенков цвета, чем градаций яркости, что облегчает контроль качества и повышает его достоверность за счет учета одновременно большего объема информации.

Другим способом цветовой радиографии является использование цветной фотопленки (п р я м о й м е т о д ). Этот метод основан на различных чувствительности и контрастности эмульсионных слоев многослойных фото- или рентгенографических цветных пленок при воздействии на них ионизирующего излучения. Если пленку просвечивать рентгеновским или  $\gamma$ -излучением, то пленка окажется разбалансированной как по контрасту, так и по чувствительности. После проявления на ней выступают различные цветовые оттенки, обусловленные интенсивностью падающего света.

При просвечивании применяют цветные радиографические пленки, которые принципиально ничем не отличаются от обычных фотопленок, но обладают большой чувствительностью к рентгеновскому излучению и состоят из двух или трех эмульсионных слоев. Каждый слой имеет свой коэффициент контрастности и чувствительности, благодаря чему определяется изменение цвета и яркости изображения при изменении толщины или плотности образцов. К числу подобных пленок относится отечественная цветная рентгеновская пленка РЦ-2. Для сокращения экспозиции и уменьшения влияния рассеянного излучения применяют металлические и флуоресцентные усиливающие экраны. Обычно используют комбинации флуоресцентного (передний) и металлического (задний) экранов.

При цветной радиографии косвенными методами и на пленку РЦ-2 время просвечивания выбирают так же, как и при обычной радиографии. Чувствительность радиографии с использованием обычных многослойных фотоматериалов несколько хуже чувствительности в случае применения высококонтрастной черно-белой радиографической пленки и в производственных условиях не превышает 3...4 %.

При цветной радиографии улучшаются выявляемость дефектов и возможность контроля изделий с большими перепадами толщин, а также определение размеров дефектов в направлении просвечивания.

**Нейтронная радиография.** Она основана на облучении объекта контроля коллимированным пучком нейтронов и регистрации теневого изображения объекта на рентгеновской пленке или другом детекторе (рис. 16.52).

Физической основой нейтронной радиографии является зависимость излучения от химического состава вещества и прежде всего от его атомного номера и массового числа. В отличие от рентгеновского и  $\gamma$ -излучений эта зависимость для нейтронов выражена более сильно. Принципиально важное значение нейтронной радиографии состоит в возможности раздельного контроля химических компонентов материала.

Например, с использованием обычных методов невозможно даже обнаружить наличие легких или органических материалов на стали при близких толщинах, а нейтронная радиография позволяет вести контроль деталей размером ~1 мм из органических материалов сквозь слой металлов толщиной в сантиметры. Это позволяет применять нейтронную радиографию при контроле композиционных материалов.

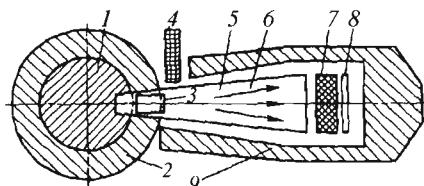


Рис. 16.52. Схема просвечивания при нейтронной радиографии:

1 – источник медленных нейтронов; 2 – защита;  
3 – диафрагма; 4 – затвор; 5 – коллиматор; 6 – пучок нейтронов; 7 – изделие; 8 – детектор; 9 – камера

В зависимости от решаемой задачи поток нейтронов получают от маломощных радиоизотопных источников или устройств типа ядерных реакторов. Нейтроны необходимых энергий выделяются с помощью металлических фильтров. Ввиду сильного взаимодействия нейтронов с водородсодержащими материалами и другими элементами с малыми атомными номерами необходимо обращать внимание на используемое оборудование, приспособления и тщательно вести подготовку к нейтронной радиографии. Держатели, кассеты, маркировочные знаки и т.п. должны быть изготовлены из материалов, имеющих малое сечение активации нейронами, например, кассеты и держатели – из алюминия, маркировочные знаки – из кадмия. С поверхности контролируемого изделия должны быть тщательно удалены все следы влаги, смазки и загрязнений, содержащих вещества, которые имеют большие сечения взаимодействия.

Нейтронную радиографию используют: при контроле радиоактивных изделий и деталей, в первую очередь тепловыделяющих элементов ядерных реакторов; контроле деталей из некоторых легких материалов, например, пластмасс; для обнаружения водородсодержащих включений в металлах; при контроле слоистых многокомпонентных материалов и тонких биологических образцов.

Для регистрации нейтронного излучения наиболее распространены рентгеновские и фототехнические пленки и детекторы, состоящие из нитроцеллюлозы, слюды и стекла. Для повышения воздействия нейтронов на детектор применяют специальные экраны – преобразователи, которые изготавливают в виде однородных тонких пластин или фольги.

Чувствительность к выявлению дефектов методом нейтронной радиографии при толщине стального изделия 10...80 мм составляет 0,5...2 %.

**Протонная радиография.** Она основана на использовании потока протонов ( $\alpha$ -частиц) для неразрушающего контроля и базируется на особенностях распространения и взаимодействия их с веществом. Источниками протонов служат те же аппараты, что и при рентгено- и  $\gamma$ -графировании. Главной особенностью применения протонной радиографии является контроль тонких изделий или их частей (типа листа, фольги и т.п.), поскольку протоны поглощаются сравнительно тонкими слоями. В отдельных случаях протонная радиография обес-

печивает значительно более высокую чувствительность (~0,1 %) по сравнению с рентгенографией.

**Контроль с помощью позитронов.** Данный метод контроля может быть применен для определения накопления усталостных напряжений в металлах до появления усталостных трещин, нахождения величины и степени пластической деформации. Контроль основан на том, что в начальной стадии усталостных явлений, когда образуются дислокации, в их области появляются отрицательные заряды. Позитроны, облучающие металл, притягиваются к областям расположения дислокаций и взаимодействуют с электронами. При аннигиляции (превращении) позитрона и электрона возникают  $\gamma$ -кванты. По количеству  $\gamma$ -квантов и среднему времени жизни позитронов можно определить начало усталостных нарушений в металле.

**Авторадиография.** Она заключается в регистрации собственного излучения изделия, в простейшем варианте осуществляется помещением на поверхность контролируемого образца мелкозернистой чувствительной фотопленки, на которой фиксируется распределение ионизирующего излучения от близко расположенных участков. Метод авторадиографии успешно применяют для контроля полуфабрикатов и изделий, содержащих радиоактивные вещества в составе материала или какой-либо его части.

#### 16.3.5. МЕТОДЫ РАДИОСКОПИИ, РАДИОМЕТРИИ И ТОМОГРАФИИ

**Радиоскопия.** Этот метод контроля основан на просвечивании контролируемых объектов рентгеновским излучением с последующим преобразованием радиационного изображения объекта в светотеневое или электронное и передачей этого изображения на расстояние оптикой или телевизионной техникой для визуального анализа на выходных экранах. Назначение радиоскопического метода в основном то же, что и радиография. Целесообразность этого метода определяется с учетом того, что по сравнению с радиографией чувствительность радиоскопического метода к дефектам примерно в 2 раза ниже, а производительность в 3 – 5 раз выше. Этот метод позволяет просматривать внутреннюю структуру контролируемого изделия в процессе его перемещения относительно входного экрана со скоростью

0,3...1,5 м/мин в зависимости от типа преобразователя и толщины изделия.

В качестве преобразователей теневого радиационного изображения в светотеневое или электронное применяют флуороскопический экран, сцинтиляционный кристалл, электронно-оптическое устройство и реже электролюминесцентный экран. Особое положение занимает рентген-видикон, преобразующий рентгеновское изображение объекта непосредственно в видеосигнал без потери информации.

**Флуороскопические экраны** изготавливают нанесением на картонную основу флуоресцентного вещества (люминофора), которое представляет собой, например, смесь кристаллов сульфида цинка ( $ZnS$ ) и сульфида кадмия ( $CdS$ ), активированную серебром. В результате процессов взаимодействия рентгеновского и  $\gamma$ -излучений с веществом люминофора возникает люминесценция со свечением в зеленой или желто-зеленой части видимого спектра. Чувствительность контроля оказывается в 3 – 6 раз ниже, чем при радиографии. Эти экраны служат для регистрации электронов, протонов,  $\alpha$ -частиц, а также могут быть использованы входными элементами рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП) и во флюорографии.

**Сцинтиляционные кристаллы** представляют собой монокристаллы неорганического (щелочно-галоидные) и органического (антрацен) происхождения с различными активаторами. Наиболее распространены монокристаллы первого типа на основе йодистого натрия ( $NaI$ ), йодистого калия ( $KI$ ), йодистого цезия ( $CsI$ ), активированные таллием ( $Tl$ ). Принцип действия сцинтиляционных кристаллов основан на способности люминофоров светиться кратковременными вспышками (последовательность 100 мкс...1 нс). Кристаллы  $CsI$  имеют меньшую яркость свечения, чем кристаллы  $NaI$ , при воздействии на них одинаковыми дозами излучения одной энергии. Однако большее применение нашли первые из них в связи с высокой гигроскопичностью кристаллов  $NaI$ .

Сцинтиляционные кристаллы по ряду параметров превосходят флуороскопические экраны, в частности разрешающая способность кристаллов  $CsI$  10...12 линий/мм, тогда как при использовании флуороскопических экранов разрешающая способность контроля  $\leq 3$  линий/мм.

К преимуществам этих кристаллов относят:

- беззернистую структуру, позволяющую создавать детекторы большой толщины для эффективной регистрации высоких энергий (15...30 МэВ);
- небольшой промежуток времени между свечениями ( $10^{-5}...10^{-8}$  с), что обеспечивает безынерционность появления и исчезновения изображения;
- удовлетворительное совпадение спектра свечения кристалла со спектральной характеристикой фотокатодов усилителей яркости изображения;
- большую плотность вещества и прозрачность для собственного излучения;
- возможность получения монокристаллов большого размера (до 230 мм).

Эти кристаллы широко применяют в рентгенотелевизионных установках типа «Интроскоп». При их использовании чувствительность контроля в 2,5 – 2 раза ниже, чем при радиографии, скорость контроля 1...1,5 м/мин.

**Электролюминесцентные экраны** основаны на свечении некоторых люминофоров под действием переменного электрического поля. Они работают по следующему принципу. К экрану в местах проводящих покрытий подведено высокое напряжение (600...800 В), которое падает на фотопроводнике из-за его высокого электрического сопротивления, в то время как на слой люминофора приходится незначительная часть падающего напряжения. При облучении сопротивление фотопроводника резко падает, а на люминофоре возрастает, что вызывает его свечение. К недостаткам электролюминесцентных экранов следует отнести небольшой промежуток времени между свечениями, а также свечение люминофора, приводящее к возникновению приложенном напряжении первоначального фона, который снижает контраст получаемого изображения. Электролюминесцентные экраны, используемые в качестве преобразователей, увеличивают яркость свечения в 100 раз.

При непосредственном наблюдении флуороскопический экран и сцинтиляционный монокристалл не могут обеспечить оптимальную для расшифровки яркость изображения. Для создания таких изображений применяют специальные усилители рентгеновского изображения – РЭОП (рис. 16.53). В них смещены флуороскопический экран 6 (преобразователь радиационного изображения в оптическое) и фотокатод 7 (преобразователь оп-

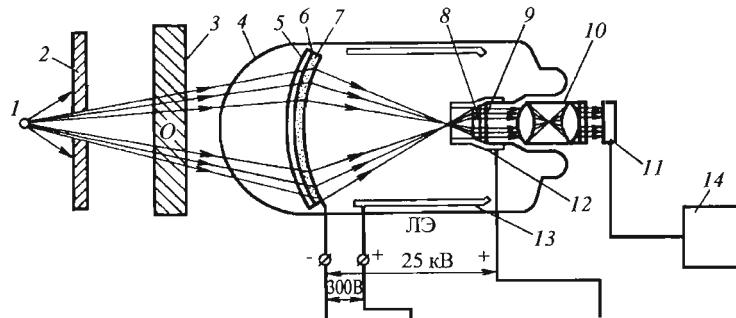


Рис. 16.53. Схема РЭОП:

1 – источник излучения; 2 – свинцовая диафрагма; 3 – просвечиваемый объект; 4 – стеклянная вакуумная трубка; 5 – алюминиевая подложка; 6 – флуорескопический экран; 7 – фотокатод; 8, 9 – выходные экраны; 10 – оптика; 11 – передающая телекамера; 12 – анод; 13 – металлическое покрытие; 14 – экран телевизора; ЛЭ – люминесцентный экран

тического изображения в электронное). Полупрозрачный сурьмяно-цеизиевый фотокатод под действием свечения люминофора, которое вызывается рентгеновским излучением, испускает электроны в количестве, пропорциональном интенсивности света. Электроны, ускоренные по энергии в  $10^4$  раз (разность потенциалов 25 кВ), фокусируются на выходных экранах 8 и 9, где посредством люминофора электронное изображение преобразуется в оптическое. Усиление яркости изображения достигается, с одной стороны, увеличением светового потока на выходном экране в ~100 раз благодаря ускоряющему напряжению и, с другой стороны, улучшением светимости выходного экрана в ~16 раз в результате уменьшения электронно-оптического изображения в 4 раза. Изображение на выходном экране рассматривается при помощи оптики 10 или передается телекамерой 11 на видеоконтрольное устройство – экран 14.

РЭОП классифицируют:

- по схемам организации сбора информационных данных на преобразователи с использованием широкого, веерного и игольчатого пучков;
- по коэффициенту усиления яркости на усилители радиационного изображения, т.е. преобразователи, в которых посредством дополнительных источников энергии, не связанных с ионизирующим излучением, при облучении происходит радиационно-оптическое преобразование с коэффициентом усиления яркости  $>1$ , и на флуоресцентные экраны с коэффициентом усиления, равным 1.

Основными параметрами РЭОП являются: относительный квантовый выход, чувстви-

тельность, предел разрешения, динамический диапазон, степень чистоты рабочего поля, временное разрешение.

Для РЭОП, регистрирующих кванты проникающего через контролируемый объект излучения, относительный квантовый выход  $Q$  – существенный параметр. Величина  $Q$  – это доля падающих на преобразователь квантов, образующих измеримое событие, например импульс фотонов. Квантовый выход всегда меньше единицы. На практике эти события в полном процессе регистрации почти всегда имеют разные статические веса, т.е. в фотонных импульсах разное число фотонов.

Пределом разрешения радиационного преобразователя называют наибольшее число штрихов в 1 мм исходного изображения, созданного штриховой мицой, которые обнаруживаются раздельно при анализе выходного изображения в оптимальных условиях работы преобразователя.

Динамический диапазон РЭОП – наибольшее отношение плотностей потока энергии излучения на двух полях исходного изображения, при котором на выходном изображении каждого из этих полей одновременно обнаруживаются (визуально) объекты заданного размера, причем контрастность исходного изображения указанных объектов имеет одинаковое значение для каждого из полей.

Временное разрешение – реакция преобразователя на изменение радиационного изображения во времени.

Следует отметить, что все указанные выше параметры взаимосвязаны сложным образом. Так, относительный квантовый выход  $Q$

зависит от размера элемента исходного выходного изображения, т.е. от пространственной частоты, и неодинаков в разных участках рабочего динамического диапазона. Разрешение РЭОП также разное в различных участках динамического диапазона.

В установках РИ-60ГЭ использован монокристалл, блокированный с одноканальным ЭОП и передающей телевизионной трубкой (рис. 16.54). Установка позволяет контролировать толщины до 70 мм при относительной чувствительности метода 2...4 %.

**Рентген-видиконы** сочетают в себе световую передающую телевизионную камеру (видикон) с чувствительным к рентгеновскому излучению фотопроводящим слоем на основе оксида цинка, оксида свинца, аморфного селена, сернистой сурьмы и других соединений, нанесенного на алюминиевый диск (рис. 16.55). Под действием ионизирующего излучения с фотопроводящего слоя испускаются фотоэлектроны, которые ускоряются электрическим полем и регистрируются катодом трубы. Далее полученный сигнал передается через телевизионный блок связи на приемную трубку, где электронное изображение преобразуется в световое. Увеличение рентген-видикона составляет 2...50<sup>х</sup>, разрешающая способность 30...50 линий/мм.

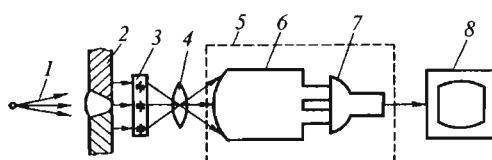


Рис. 16.54. Принципиальная схема установки РИ-60ГЭ на монокристалле:

- 1 – излучение;
- 2 – сварное соединение;
- 3 – монокристалл;
- 4 – объектив;
- 5 – передающий блок;
- 6 – ЭОП;
- 7 – телевизионная трубка;
- 8 – информационная телевизионная система

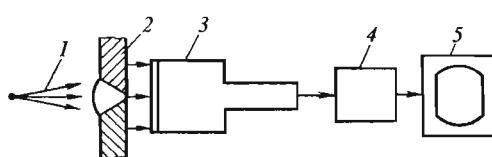


Рис. 16.55. Принципиальная схема рентген-видикона:

- 1 – излучение;
- 2 – сварное соединение;
- 3 – рентген-видикон;
- 4 – блок связи;
- 5 – информационная телевизионная система

Недостатками рентген-видикона являются значительная инерционность и низкий динамический диапазон. Малая толщина ( $\leq 0,3$  мм) входного экрана не позволяет применять рентген-видиконы для регистрации фотонов в диапазоне высоких энергий.

**Радиометрический метод.** Он основан на просвечивании изделий ионизирующими излучениями с преобразованием плотности потока или спектрального состава прошедшего излучения в пропорциональный электрический сигнал. Любая система радиометрического контроля содержит источник излучения, детектор, схему обработки и регистрации информации (рис. 16.56). В качестве источников излучения применяют в основном  $\gamma$ -изотопы, ускорители и реже рентгеновские аппараты. Детекторами излучения являются главным образом сцинтиляционные кристаллы с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), реже – ионизационные камеры и газоразрядные счетчики.

Узкий (коллимированный) пучок ионизирующего излучения (см. рис. 16.56) перемещается по контролируемому объекту, последовательно просвечивая все его участки. Излучение, прошедшее через объект, регистрируется счетчиком, на выходе которого образуется электрический сигнал величиной, пропорциональной интенсивности поступающего излучения. Электрический сигнал, прошедший через усилитель, регистрируется устройством, которым могут быть самописец, осциллограф, миллиамперметр и т.д. При наличии дефекта в шве регистрирующее устройство отмечает возрастание интенсивности.

Для увеличения разрешающей способности метода просвечивать объекты следует как можно более узким пучком. Однако чрезмерное уменьшение поперечного сечения коллиматора снижает число фотонов, падающих на детектор. Размеры площади окна коллиматора у современных радиометрических дефектоскопов  $\sim 1$  см<sup>2</sup>.

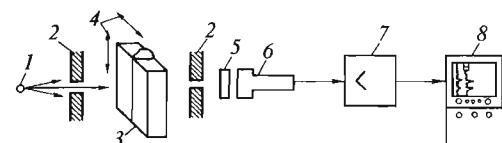


Рис. 16.56. Схема радиометрического метода контроля:

- 1 – источник излучения;
- 2 – коллиматоры;
- 3 – контролируемый объект;
- 4 – направления перемещения;
- 5 – сцинтиляционный кристалл;
- 6 – ФЭУ;
- 7 – усилитель;
- 8 – регистрирующий прибор

Радиометрические методы позволяют определить две координаты дефекта: протяженность и его лучевой размер. Разнообразие типов дефектов, их случайное группирование и расположение не позволяют сделать однозначное заключение о характере дефекта, так как различные дефекты могут приводить к одинаковому возмущению электрического сигнала на выходе детектора. Длину дефекта  $l_{\text{деф}}$  определяют по следующей формуле:  $l_{\text{деф}} = l_i v_0 / (v_1 - a)$ , где  $l_i$  – протяженность импульса на диаграммной ленте;  $v_0$  – скорость контроля;  $v_1$  – скорость записи;  $a$  – размер окна коллиматора в направлении контролируемого изделия. Объемные дефекты определяют с точностью до 3...5 %.

Преимущества радиометрии: высокая чувствительность (0,3...3,0 %), возможность бесконтактного контроля, сравнительно (с радиографией) высокая производительность. Недостатки: необходимость одновременного перемещения на одинаковом расстоянии по разные стороны от объекта источника и детектора; невозможность определения формы и глубины дефекта; влияние рассеянного излучения. В промышленности при контроле стальных изделий толщиной 20...100 мм применяют установки РДР-21; при толщинах 70...200 и 100...1000 мм – соответственно РДР-25 и РДР-10Р и др.

**Томография.** Сущность метода заключается в получении резкого изображения только тех частей объекта, которые находятся в тонком ( $\leq 2$  мм) слое на определенной глубине или в нескольких тонких слоях, разделенных интервалами заданной толщины (шагом томографии). Этого добиваются, например, синхронным перемещением (рис. 16.57) рентгеновской трубки ( $A_1 \rightarrow A_3$ ) и кассеты с экранами и пленкой ( $O_1 \rightarrow O_3$ ) относительно пространственно-го центра качения  $O$ . В результате получают изображение выделенного слоя  $MN$ , расположенного в плоскости, проходящей через центр качения. Это изображение представляет собой геометрическое место точек выделенного слоя, тени которых неподвижны по отношению к пленке. Таким образом, в томографии используют эффект динамической нерезкости изображения. При этом методе синхронное движение источника излучения и пленки относительно объекта позволяет размыть изображения неанализируемых дефектов или слоя, изображения которых в обычно принятом методе радиографии накладываются друг на друга, и более резко выделить изображение, проверяющее на предмет обнаружения дефекта или слоя.

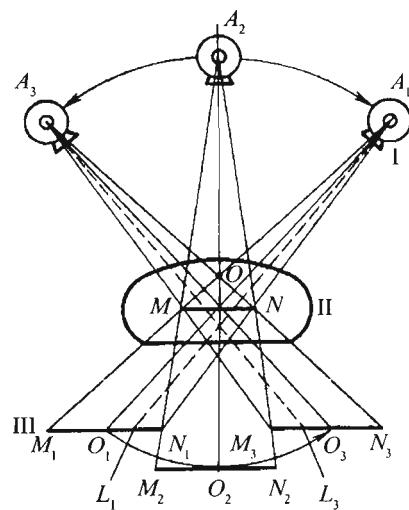


Рис. 16.57. Схема образования томографического изображения:

I – рентгеновская трубка; II – объект контроля;  
III – кассета с пленкой

В настоящее время широко используют вычислительную томографию. Она реализует возможность решения обратной задачи интроскопии: по объемной информации об интенсивности прошедшего в различных направлениях излучения найти распределение линейного коэффициента ослабления, связанного с плотностью материала внутри контролируемого объекта. Томограммы по сравнению с обычным рентгеновским изображением гораздо более информативны, поскольку детально показывают внутреннюю геометрическую структуру, распределение плотности и элементного состава материалов, что невозможно при обычной радиографии. Повышенный объем информации в рентгеновской вычислительной томографии получается благодаря применению большого числа (250...500) первичных преобразователей, непрерывного вращения системы преобразователь – детектор вокруг объекта на 360°.

Томографы дают возможность решать многие задачи неразрушающего контроля – как интроскопии, так и количественной оценки параметров различных объектов. Сейчас их широко применяют для контроля объектов с небольшим затуханием излучения, в частности, для контроля композитов, углепластиков, резины и т.п. толщиной до 20 мм и размером до 1,5 м при разрешении по плотности 0,2 %.

Необходимо отметить, что при использовании томографов относительная чувствительность контроля при выявлении объемных дефектов в пластмассах 0,2...0,4 %, тогда как для радиографии этот показатель равен 3...4 %. С помощью томографов уверенно обнаруживаются трещины с раскрытием 0,01...0,02 мм, что на порядок выше, чем при обычной радиографии.

В промышленности нашли применение отечественные вычислительные томографы ВТ-1000 и ВТ-1500, в которых изделие вращается, а источник либо неподвижен, либо совершает угловое перемещение. В качестве источника излучения используют рентгеновские аппараты, а в последних – линейные ускорители, микротроны, бетатроны с энергией излучения 1...10 МэВ.

## 16.4. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

### 16.4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

**Колебания и волны.** Колебаниями называют многократное повторение одинаковых или близких к одинаковым процессов. Процесс распространения колебаний в среде именуют волновым. Линию, указывающую направление распространения волны, называют лучом, а границу, определяющую колеблющиеся частицы от частиц среды, еще не начавших колебаться, – **фронтом волны**.

Время, за которое совершается полный цикл колебаний, именуется периодом  $T$  и измеряется в секундах. Величину  $f = 1 / T$ , показывающую, сколько раз в секунду повторяется колебание, называют частотой и измеряют в  $\text{с}^{-1}$ . Величина  $\omega$ , показывающая число полных оборотов точки по окружности за  $2T$  с, называется **круговой частотой**  $\omega = 2\pi / T = 2\pi f$  и измеряется в радианах в секунду (рад/с).

**Фаза волны** – это параметр, показывающий, какая часть периода прошла с момента начала последнего цикла колебаний.

**Длиной волны**  $\lambda$  называют минимальное расстояние между двумя точками, колеблющимися в одинаковой фазе. Длина волны связана с частотой  $f$  и скоростью  $c$  соотношением:  $\lambda = c / f$ . Плоская волна, распространяющаяся вдоль горизонтальной оси  $X$ , описывается формулой

$$u = U \cos(\omega t - kx), \quad (16.5)$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число;  $U$  – амплитуда колебаний.

Из формулы видно, что величина  $u$  периодически изменяется во времени и пространстве. В качестве изменяющейся при колебаниях величины используются смещение частиц из положения равновесия  $u$  и акустическое давление  $p$ .

В ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии обычно используют колебания с частотой 0,5...15 МГц (длина продольной волны в стали 0,4...12 мм) и амплитудой смещения  $10^{-11} \dots 10^{-4}$  мм (возникающие в стали на частоте 2 МГц акустические напряжения  $10 \dots 10^8$  Па). Интенсивность волны  $I$  равна

$$I = p^2 / (2\rho c),$$

где  $\rho$  – плотность среды, в которой распространяется волна.

Интенсивность используемых для контроля волн очень мала ( $\sim 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup>). При дефектоскопии регистрируют не интенсивность, а амплитуду волн  $A$ . Обычно измеряют ослабление амплитуды  $A'$  относительно амплитуды возбужденных в изделии колебаний  $A_0$  (зондирующего импульса), т.е. отношение  $A'/A_0$ . Для этого применяют логарифмические единицы – децибелы (дБ), т.е.  $A'/A_0 = 20 \lg A'/A_0$ .

**Типы волн.** В зависимости от направления колебаний частиц относительно луча различают несколько типов волн.

**Продольной волной** называется такая волна, в которой колебательное движение отдельных частиц происходит в том же направлении, в котором распространяется волна (рис. 16.58).

Продольная волна характеризуется тем, что в среде чередуются области сжатия и разрежения, или повышенного и пониженного давления, или повышенной и пониженной плотности. Поэтому их также называют волнами давления, плотности или сжатия. Продольные волны могут распространяться в твердых телах, жидкостях, газах.

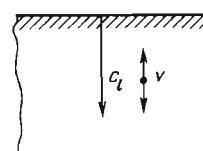


Рис. 16.58. Колебание частиц среды  $v$  в продольной волне

**Сдвиговой (поперечной)** называют такую волну, в которой отдельные частицы колеблются в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны. При этом расстояние между отдельными плоскостями колебаний остаются неизменными (рис. 16.59).

Продольные и поперечные волны, получившие обобщенное название «объемные волны», могут существовать в неограниченной среде. Эти волны наиболее широко применяются для УЗ дефектоскопии.

**Скоростью распространения звуковой волны** с называется скорость распространения определенного состояния в материальной среде (например, сжатия или разрежения для продольной волны). Скорость звука для различных типов волн различна, причем для продольной и поперечной волн она является характеристикой среды, не зависящей от параметров УЗ волны.

Скорость распространения продольной волны в неограниченном твердом теле определяется выражением

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (16.6)$$

где  $E$  – модуль Юнга, определяемый как отношение между величиной растягивающей силы, приложенной к некоторому стержню и возникающей при этом деформацией;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, представляющий собой отношение изменения ширины стержня к изменению его длины, если растяжение стержня проводится по длине;  $\rho$  – плотность материала.

Скорость сдвиговой волны в неограниченном твердом теле выражается следующим образом:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (16.7)$$

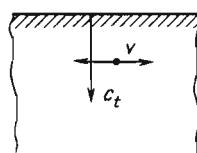


Рис. 16.59. Колебание частиц среды  $v$  в поперечной волне

Поскольку в металлах  $\nu \approx 0,3$ , то между продольной и поперечной волной существует соотношение

$$c_t \approx 0,55 c_l.$$

**Поверхностными волнами (волнами Рэлея)** называют упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной (или слабонагруженной) границы твердого тела и быстро затухающие с глубиной. Поверхностная волна является комбинацией продольных и поперечных волн. Частицы в поверхностной волне совершают колебательное движение по эллиптической траектории (рис. 16.60). Большая ось эллипса при этом перпендикулярна к границе. Поскольку входящая в поверхностную волну продольная составляющая затухает с глубиной быстрее, чем поперечная, вытянутость эллипса с глубиной изменяется.

Поверхностная волна имеет скорость

$$c_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}. \quad (16.8)$$

Для металлов  $c_s \approx 0,93 c_l \approx 0,51 c_t$ .

В зависимости от геометрической формы фронта различают следующие виды волн: **сферическую** – звуковую волну на небольшом расстоянии от точечного источника звука;

**цилиндрическую** – звуковую волну на небольшом расстоянии от источника звука, представляющего собой длинный цилиндр маленького диаметра;

**плоскую** – ее может излучать бесконечно колеблющаяся плоскость.

Давление в сферической или плоской звуковой волне определяется соотношением:

$$p = \rho c v, \quad (16.9)$$

где  $v$  – величина колебательной скорости.

Величина  $\rho c = z$  называется акустическим сопротивлением или акустическим импедансом.

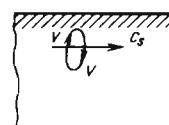


Рис. 16.60. Колебание частиц среды  $v$  в поверхностной волне

Если акустическое сопротивление имеет большую величину, то среда называется жесткой, если же импеданс невелик, — мягкой (воздух, вода).

**Нормальными, или волнами в пластинах**, называют упругие волны, распространяющиеся в твердой пластине (слое) со свободными или слабонагруженными границами. Нормальные волны бывают двух поляризаций: вертикальной и горизонтальной. Из двух типов волн наибольшее применение в практике получили волны Лэмба — нормальные волны с вертикальной поляризацией. Они возникают вследствие резонанса при взаимодействии падающей волны с многократно отраженными волнами внутри пластины.

Для уяснения физической сущности волн в пластинах рассмотрим вопрос образования нормальных волн в жидком слое (рис. 16.61).

Пусть на слой толщиной  $h$  падает извне плоская волна под углом  $\beta$ . Линия  $AD$  показывает фронт падающей волны. В результате преломления на границе, в слое возникает волна с фронтом  $CB$ , распространяющаяся под углом  $\alpha$  и претерпевающая многократные отражения в слое.

При определенном угле падения  $\beta$  волна, отраженная от нижней поверхности, совпадает по фазе с прямой волной, идущей от верхней поверхности. Это и есть условие возникновения нормальных волн. Угол  $\alpha$ , при котором происходит такое явление, может быть найден из формулы

$$h \cos \alpha = n\lambda_2 / 2. \quad (16.10)$$

Здесь  $n$  — целое число;  $\lambda_2$  — длина волны в слое.

Для твердого слоя сущность явления (резонанс объемных волн при наклонном падении) сохраняется. Однако условия образования нормальных волн очень усложняются благодаря наличию в пластине продольных и попереч-

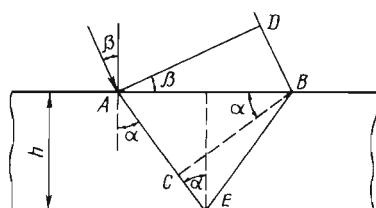


Рис. 16.61. К вопросу возникновения нормальных волн в слое жидкости

ных волн. Различные типы волн, существующие при различных значениях  $n$ , называют модами нормальных волн. **Волны с нечетными значениями  $n$**  именуют **симметричными**, так как движение частиц в них симметрично относительно оси пластины. Волны с четными значениями  $n$  называют **антисимметричными** (рис. 16.62).

**Головные волны.** В реальных условиях УЗ контроля наклонным преобразователем фронт УЗ волны излучающего пьезоэлемента имеет неплоскую форму. От излучателя, ось которого ориентирована под первым критическим углом к границе раздела, на границу падают также продольные волны с углами, несколько меньшими и несколько большими первого критического. При этом в стали возбуждаются ряд типов УЗ волн.

Вдоль поверхности распространяется **негомогенная продольно-поверхностная волна** (рис. 16.63). Эту волну, состоящую из поверхностной и объемной компонент, называют также **вытекающей, или ползучей**. Частицы в этой волне движутся по траекториям в виде эллипсов, близких к окружностям. Фазовая скорость вытекающей волны  $c_b$  незначительно превышает скорость продольной волны (для стали  $c_b \equiv 1,04c_l$ ).

Эти волны существуют на глубине, примерно равной длине волны, и быстро затухают при распространении: амплитуда волны затухает в 2,7 раза быстрее на расстоянии  $1,75\lambda$  вдоль поверхности. Ослабление связано с тем, что в каждой точке границы раздела генерируются поперечные волны под углом  $\alpha_{l_2}$ , равным третьему критическому углу, называемые **боковыми волнами**. Этот угол определяется из соотношения

$$\sin \alpha_{l_2} = \frac{c_{l_2}}{c_{p\alpha}}. \quad (16.11)$$

Для стали  $\alpha_{l_2} = 33,5^\circ$ .

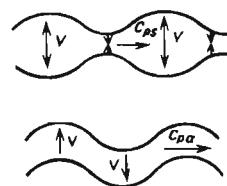


Рис. 16.62. Колебание частиц среды  $v$  в нормальной волне

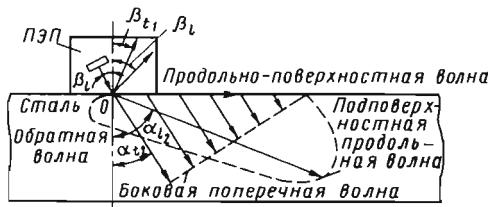


Рис. 16.63. Акустическое поле преобразователя головной волны:  
ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

Кроме вытекающей возбуждается также головная волна, получившая широкое применение в практике УЗ контроля. Головной называют продольно-подповерхностную волну, возбуждаемую при падении УЗ пучка на границу раздела под углом, близким к первому критическому. Скорость этой волны равна скорости продольной волны. Своего амплитудного значения головная волна достигает под поверхностью вдоль луча с углом ввода 78°.

Головная волна, как и вытекающая, порождает боковые поперечные волны под третьим критическим углом к границе раздела. Одновременно с возбуждением продольно-поверхностной волны образуется и обратная продольно-поверхностная волна – распространение упругого возмущения в сторону, противоположную прямому излучению. Ее амплитуда в ~100 раз меньше амплитуды прямой волны.

Головная волна нечувствительна к неровностям поверхности и реагирует лишь на дефекты, залегающие под поверхностью. Ослабление амплитуды продольно-подповерхностной волны вдоль луча любого направления происходит как в обычной объемной продольной волне, т.е. пропорционально  $1/r$ , где  $r$  – расстояние вдоль луча.

На рис. 16.64 показано изменение амплитуды эхосигнала от плоскодонных отверстий, расположенных на разной глубине. Чувствительность к дефектам вблизи поверхности близка к нулю. Максимальная амплитуда при расстоянии 20 мм достигается для плоскодонных отверстий, расположенных на глубине 6 мм.

#### 16.4.2. СВОЙСТВА УЗ КОЛЕБАНИЙ

**Высокая направленность.** При УЗ контроле используют ПЭП, у которых размеры излучателя (пьезопластины) гораздо больше длины волны УЗ. Благодаря этому УЗ распространяется направленным пучком. Вблизи излучателя (рис. 16.65), на участке, называемом

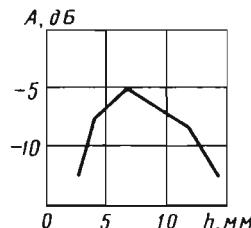


Рис. 16.64. Амплитуда отражения головной волны в зависимости от глубины залегания плоскодонных отверстий

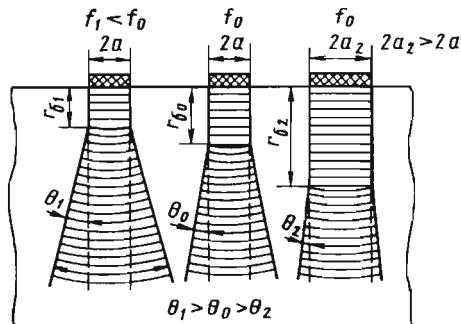


Рис. 16.65. Изменение направленности УЗ пучка от параметра  $af$

ближней зоной или зоной Френеля, УЗ пучок почти не расходится. Протяженность этой зоны  $r_0$  для призматического искателя

$$r_0 = \frac{(a \cos \alpha / \cos \beta)^2}{\lambda}, \quad (16.12)$$

где  $a$  – радиус пьезоэлемента;  $\lambda$  – длина волны в изделии;  $\beta$  – угол призмы;  $\alpha$  – угол ввода в металл.

Выражение (16.12) справедливо в области  $\beta_{kp1} \leq \beta \leq \beta_{kp2}$ , где  $\beta_{kp1}$  и  $\beta_{kp2}$  – первый и второй критические углы. При  $r > r_0$  начинается постепенное расходжение УЗ волны, плоская волна переходит в сферическую. Эта зона называется дальней зоной, или зоной Фраунгофера.

Угол расхождения определяется выражением

$$\theta = \arcsin 0,61 \frac{\lambda}{a} = \arcsin 0,61 \frac{c}{af}. \quad (16.13)$$

Как видно из выражения (16.13), направленность УЗ пучка тем выше, чем больше произведение радиуса излучателя  $a$  на частоту

излучаемых колебаний  $f$ . Благодаря этому свойству (высокой направленности) ультразвуком можно контролировать большие толщины (до 10 м). При распространении УЗ волн от источника их интенсивность падает.

**Затухание УЗ.** В выражении для плоских УЗ волн, так же и в основном уравнении движения упругой среды, не учитывается ослабление волн, связанное с затуханием УЗ. В реальных средах по причине внутреннего трения, неидеальных упругих свойств и других эффектов затухание УЗ имеет существенное значение.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения  $\delta_p$  и рассеяния  $\delta_r$ , т.е.  $\delta = \delta_p + \delta_r$ .

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии остается звуковой, но уходит из направленно-распространяющейся волны в результате отражений на границах зерен и неоднородностей.

Поглощение звука в твердых телах обуславливается в основном внутренним трением и теплопроводностью. Поглощение поперечных волн меньше, чем продольных, так как они не связаны с адиабатическими изменениями объема, при которых появляются потери на теплопроводность. Коэффициент поглощения в твердых телах пропорционален  $f$  (стекло, биологические ткани, металлы) или  $f^2$  (резина, пластмассы).

В монокристаллах затухание определяется поглощением УЗ. Металлы, применяемые на практике, имеют поликристаллическое строение, и в них обычно затухание определяется прежде всего рассеянием. В кристаллах скорость звука имеет разное значение в зависимости от направления его распространения относительно осей симметрии кристалла. Это явление называют *упругой анизотропией*.

В куске металла кристаллы ориентированы различным образом, поэтому при переходе УЗ из одного кристалла в другой скорость звука может изменяться в большей или меньшей степени. В результате возникают частичное отражение, преломление и трансформация УЗ, что обуславливает механизм рассеяния (рис. 16.66).

Большое влияние на коэффициент рассеяния в металлах оказывает отношение средней величины зерна  $D$  и длины волны УЗ  $\lambda$ . При  $\lambda \ll D$  звук поглощается каждым зерном как одним большим кристаллом, затухание определяется в основном поглощением. При

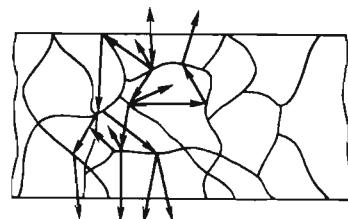


Рис. 16.66. Схема распространения УЗ волн в поликристаллическом твердом теле

$\lambda \approx D$  рассеяние УЗ очень велико. Он как бы проникает, диффундирует между отдельными кристаллитами. Это область *диффузного рассеяния*.

Особенно велико затухание при  $\lambda \approx \approx (2...4)D$ . Здесь к диффузному рассеянию добавляется поглощение. На рис. 16.67 показано затухание продольной и поперечной волн в зависимости от частоты.

При  $\lambda > (8...10)D$  происходит рассеяние УЗ мелкими зернами и коэффициент  $\delta$  пропорционален  $Df^4$  (рэлеево рассеяние). При  $4D \leq \lambda \leq 10D$  коэффициент затухания пропорционален произведению  $Df^2$ . Наименьшее затухание будет при  $\lambda \geq (20...100)D$ . Если это условие выполняется, то можно контролировать изделия толщиной 8...10 м.

Значение  $\delta$  в большой мере определяет частоту УЗ колебаний. С одной стороны, с увеличением частоты возрастает амплитуда сигнала вследствие улучшения направленности излучения, а с другой, уменьшается амплитуда сигнала из-за увеличения затухания.

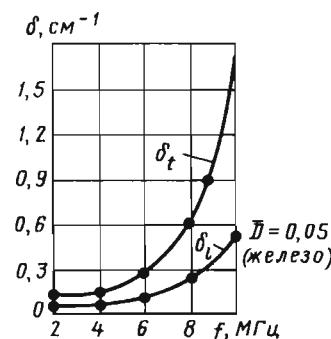


Рис. 16.67. Зависимость коэффициента затухания продольной ( $\delta_t$ ) и поперечной ( $\delta_l$ ) волн от частоты

**Трансформация УЗ колебаний.** При наклонном падении (под углом  $\beta$ ) продольной волны из одной твердой среды на границу с другой твердой средой на границе раздела происходят отражение, преломление и трансформация (расщепление) волны, и в общем случае возникают еще четыре волны: две преломленные – продольная и поперечная со скоростями соответственно  $c_l$  и  $c_t$ , и две отраженные – продольная и поперечная со скоростями соответственно  $c_{l_1}$  и  $c_{t_1}$  (рис. 16.68). Направления распространения отраженных и преломленных волн отличаются от направления падающей волны, однако все эти направления лежат в одной плоскости – плоскости падения.

Плоскостью падения называют плоскость, образованную падающим лучом и нормалью к отражающей поверхности, восстановленной в точке падения луча. Углы, образованные с этой нормалью, называют соответственно углами падения, отражения и преломления. Углы отражения и преломления зависят от скорости звука в обеих средах и связаны между собой законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \beta}{c_l} = \frac{\sin \beta_1}{c_{l_1}} = \frac{\sin \beta_t}{c_{t_1}} = \frac{\sin \alpha_l}{c_l} = \frac{\sin \alpha_t}{c_t}. \quad (16.14)$$

Эффективность преломления определяется отношением скоростей прошедшей и падающей волн:  $n = c_{\text{пр}} / c_{\text{пад}}$ , называемым коэффициентом преломления. Чем больше  $n$ , тем сильнее преломляется падающий луч, поэтому прошедшая продольная волна преломляется значительно, чем поперечная.

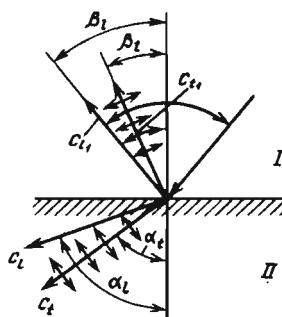


Рис. 16.68. Трансформация УЗ волны на границе раздела двух твердых сред I и II

Угол, при котором исчезает преломленная продольная волна ( $\alpha_l = 90^\circ$ ), называют первым критическим углом  $\beta_{kp1}$  (рис. 16.69, а),  $\beta_{kp1} = \arcsin c_{l_1} / c_l$ . Угол, при котором исчезает преломленная поперечная волна ( $\alpha_t = 90^\circ$ ), – второй критический  $\beta_{kp2}$  (рис. 16.69, б),  $\beta_{kp2} = \arcsin c_{t_1} / c_l$ .

При  $\beta_{kp1} \leq \beta \leq \beta_{kp2}$  в среде II преимущественно распространяется поперечная волна. Для пары плексиглас – сталь  $\beta_{kp1} \approx 28^\circ$ , а  $\beta_{kp2} \approx 59^\circ$ . Из этих соображений углы призмы преобразователей выбираются в пределах  $30\dots55^\circ$ .

В случае падения поперечной волны на границу раздела сред возможен случай, когда продольная отраженная волна отсутствует (см. рис. 16.69, в). Угол, при котором выполняется это условие, называют третьим критическим  $\beta_{kp3} = \arcsin c_t / c_l$ . Для стали он равен  $33^\circ30'$ .

**Отражение УЗ.** Коэффициентом отражения по давлению  $R_p$  называют отношение давления в отраженной волне к давлению в падающей волне. При падении волны по нормали

$$R_p = \frac{p_{\text{от}}}{p_n} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (16.15)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – акустические сопротивления.

Коэффициентом прохождения по давлению  $D_p$  называют отношение давления в прошедшей волне к давлению в падающей волне:

$$D_p = \frac{p_{\text{пр}}}{p_n} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}. \quad (16.16)$$

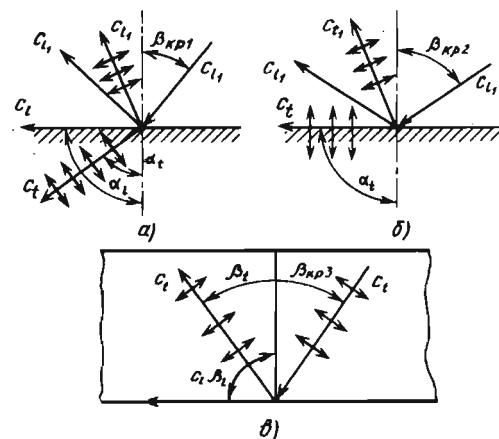


Рис. 16.69. Образование критических углов:  
а – первого; б – второго; в – третьего

В качестве примера рассмотрим падение плоской продольной волны на границу сталь – вода:

$$R_p = (0,15 - 4,6) / (0,15 + 4,6) = -0,937;$$

$$D_p = 2 \cdot 0,15 / (0,15 + 4,6) = 0,063.$$

Если перевести в проценты, то давление в отраженной волне составляет 93,7 %, а в прошедшей 6,3 % давления в падающей волне. Знак «–» означает, что фаза отраженной волны меняется на противоположную по отношению к фазе падающей волны (рис. 16.70, а).

Если волна падает из воды, то в формулах меняются местами  $z_1$  и  $z_2$ , поэтому оказывается  $R_p = +0,937$ ,  $D_p = 1,937$ . Так как  $R_p$  положительно, падающая и отраженная волны имеют одинаковые фазы. Давление в прошедшей волне почти в 2 раза больше, чем в падающей (см. рис. 16.70, б).

*Коэффициентом отражения по интенсивности* называют отношение интенсивностей отраженной и падающей волн. При падении волн по нормали

$$R = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2. \quad (16.17)$$

*Коэффициент прохождения по интенсивности* – это отношение интенсивностей прошедшей и падающей волн. Его нельзя получить возведением в квадрат коэффициента прохождения по давлению. По закону сохранения энергии

$$D = 1 - R. \quad (16.18)$$

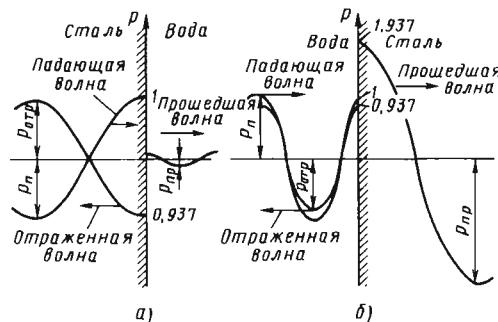


Рис. 16.70. Величина звукового давления при отражении на границе сталь – вода.

Падающая волна:  
а – в стали; б – в воде

Из формулы (16.17) видно, что чем больше отличаются акустические сопротивления сред, тем большая часть энергии звуковой волны отразится от границы раздела двух сред. Этим условием определяются и возможность, и эффективность выявления нарушений сплошности материала (включений среды с акустическим сопротивлением, отличающимся от сопротивления контролируемого материала).

Ниже приведены коэффициенты отражения по интенсивности  $R$  (%) продольной волны на границе между сталью и некоторыми средами, заполняющими полости дефектов сварки.

#### Коэффициенты отражения границы стали с другими материалами

Газ .....	100,0
Вода .....	88,00
Трансформаторное масло .....	90,00
Медь .....	0,26
Кварц .....	31,00
Шлак АН-348 .....	16,00

Отсюда видно, что шлаковые включения будут выявляться гораздо хуже дефектов таких же размеров, но с воздушным заполнением. Приведенные значения справедливы для несплошностей, размеры которых намного больше длины волны. Если же размеры несплошности в направлении, перпендикулярном к УЗ лучу, значительно меньше длины волны, то волныгибают несплошность без существенного отражения. Для получения заметного отражения достаточно, чтобы размеры ее были соизмеримы с длиной волны.

При малой толщине несплошности доля отраженной от нее энергии определяется также величиной раскрытия в направлении распространения волны. Так, если в среде с акустическим сопротивлением  $z_1$  имеется тонкий слой включения из материала с акустическим сопротивлением  $z_2$ , то коэффициент отражения по интенсивности при нормальном падении звуковой волны

$$R = \frac{\left( \frac{z_1 - z_2}{z_2 + z_1} \right)^2}{4 \operatorname{ctg} \frac{2\pi\delta}{\lambda_2} + \left( \frac{z_1 - z_2}{z_2 + z_1} \right)^2}, \quad (16.19)$$

где  $\delta$  – толщина слоя;  $\lambda_2$  – длина волны в слое.

Из приведенного выражения видно, что, если  $\delta \rightarrow \lambda_2 / 2$ , то  $\operatorname{ctg}^2 2\pi\delta / \lambda_2 \rightarrow \infty$  и  $R \rightarrow 0$ . В тех случаях, когда  $\delta \rightarrow \lambda_2 / 4$ ,  $\operatorname{ctg}^2 2\pi\delta / \lambda_2 \rightarrow 0$ .

Если в металле имеется шлаковое включение, то, подставив соответствующие значения в формулу (16.19), получим, что в зависимости от его толщины коэффициент отражения от него УЗ колебаний  $0 < R < 0,47$ . Иными словами, при определенной толщине шлаковое включение может быть звукопрозрачным, т.е. не отражающим УЗ волны.

В процессе термической обработки или под влиянием других деформаций шлак разрушается и постепенно отделяется от поврежденного металла (рис. 16.71). Вследствие этого УЗ отражается от границы сталь – газ. Коэффициент отражения УЗ волны при этом резко возрастает, достигая единицы. Оценка эквивалентного размера дефекта по этой причине также увеличивается, в то время как его реальный размер остается неизменным.

Таким образом, отражение от тонкого слоя зависит от отношения длины волны к толщине слоя и тем эффективнее, чем больше различие акустических сопротивлений слоя и окружающей среды. Расчет по формуле (16.19) показывает, что трещина в стали, заполненная воздухом и имеющая раскрытие всего в 1 мкм, должна отражать 90 % энергии падающих на нее УЗ волн частотой 2,5 МГц. Если же трещина заполнена минеральным маслом, то для отражения той же части энергии необходимо, чтобы раскрытие трещины было  $\geq 0,01$  мм.

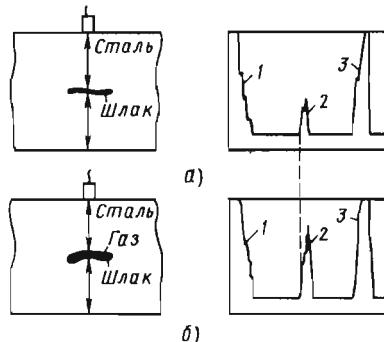


Рис. 16.71. Отражение УЗ волн от шлакового включения:

- а – шлак имеет плотное сцепление с металлом;
- б – по границе металл – шлак образовалась газовая прослойка;
- 1 – зондирующий эхопульс; 2 – эхопульс от несплошности; 3 – донный эхопульс

Практически заметное уменьшение коэффициента отражения от слоя воздуха в стали начинается при  $\delta \approx 10^{-4}$  мм.

При наклонном падении коэффициенты отражения и прозрачности зависят как от соотношения акустических сопротивлений граничащих сред, так и от угла падения. На рис. 16.72 показана зависимость коэффициентов прозрачности по энергии при падении продольной волны из оргстекла на сталь (толщина контактного слоя масла близка к нулю).

**Поляризация УЗ.** При падении плоской продольной волны на границу раздела двух сред возникают смещения и напряжения, ориентированные только в плоскости падения (см. рис. 16.69). Следовательно, векторы смещения частиц в отраженных и преломленных волнах лежат в этой же плоскости. В продольных волнах векторы смещений направлены вдоль направления распространения волны, а в поперечных – перпендикулярно к ним. Таким образом, в данном случае поперечная волна линейно-поляризована в плоскости падения.

В реальных условиях, когда излучатель продольной волны имеет ограниченные размеры, на линейно поляризованную поперечную волну, вводимую в изделие, накладывается так

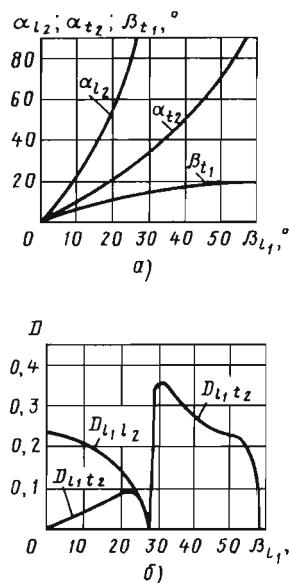


Рис. 16.72. Углы отражения, преломления (а) и коэффициенты прозрачности (б) при падении продольной волны из оргстекла на границу со сталью

называемая естественная, или неполяризованная, поперечная волна. Она возникает в связи со случайными изменениями каких-либо свойств излучателя УЗ, например неравномерностью распределения пьезомодулей по поверхности пьезопластины или случайными локальными нарушениями плоскости контактных поверхностей. Колебания частиц в таких волнах лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, но с равной вероятностью могут быть ориентированы в любом направлении этой плоскости.

Для оценки степени поляризации по аналогии с оптикой введен коэффициент

$$g = (A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min}), \quad (16.20)$$

где  $A_{\max}$  и  $A_{\min}$  – сигналы, измеренные при повороте приемника-анализатора (кварц –  $Y$ -срезка или электромагнитный акустический преобразователь) в плоскости фронта регистрации волны на  $90^\circ$ .

Коэффициент поляризации линейно поляризованной волны  $P = 1$ , волны с круговой поляризацией  $P = 0$ , а эллиптически поляризованной волны (ее понятие будет дано ниже) имеет промежуточное значение. Экспериментами показано, что соотношение амплитуд линейно поляризованной и естественной частей  $\geq 30$  дБ.

Таким образом, во всех случаях, представляющих интерес, можно считать, что поперечная волна, вводимая в изделие наклонными пьезопреобразователями, линейно поляризована в плоскости, перпендикулярной к границе раздела сред.

Такая волна называется вертикально поляризованной, или  $SV$ -волной. Если предположить, что частицы в поперечной волне колеблются перпендикулярно к плоскости падения, т.е. вдоль границы раздела двух сред, то эта волна называется горизонтально поляризованной, или  $SH$ -волной. Подобные волны могут быть реализованы специальными преобразователями, которые рассмотрим далее. Для того чтобы назвать поперечную волну  $SH$ -поляризованной, необходимо учитывать взаимную ориентацию отражателя (неоднородности) и плоскости поляризации волны.

Остановимся подробнее на вычислении коэффициента отражения поляризованной волны от свободной плоскости границы упругой среды. Назовем его  $R_{\text{эфф}}$ . Если волна вертикально поляризована относительно этой грани-

цы, то можно показать, что от границы распространяются две волны: продольная со скоростью  $c_l$  и поперечная со скоростью  $c_t$ . Коэффициенты отражения этих волн по смещениям можно найти из соотношений

$$R_t^V = -\frac{\sqrt{c_t^2 - c_l^2 \sin^2 \beta} \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta - c_l \cos \beta}{\sqrt{c_t^2 - c_l^2 \sin^2 \beta} \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta + c_l \cos \beta}; \quad (16.21)$$

$$R_l^V = -\frac{2c_l \cos \beta \operatorname{tg} 2\beta}{\sqrt{c_t^2 - c_l^2 \sin^2 \beta} \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta + c_l \cos \beta}. \quad (16.22)$$

В данном случае  $R_{\text{эфф}} = |R_t^V|$ .

На рис. 16.73 приведены графики, рассчитанные по этим формулам. Видно, что при угле падения, близком к третьему критическому (когда  $c_t^2 - c_l^2 \sin \beta = 0$ ), резко падает амплитуда поперечной и возрастает амплитуда продольной волн. При углах падения, больших третьего критического,  $R_l \equiv 0$ ,  $|R_t^V| = 1$ . При этом коэффициент отражения  $R_t^V$  становится комплексным числом, что физически означает изменение фазы отраженной волны. Здесь возможно незеркальное отражение (рис. 16.74), проявляющееся в смещении УЗ пучка при отражении. Чем ближе угол падения к третьему

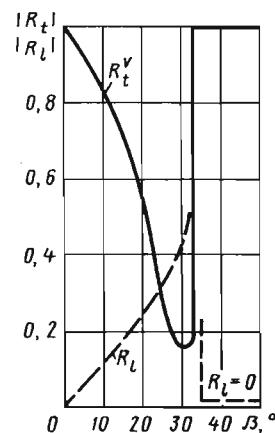


Рис. 16.73. Изменение коэффициента отражения  $R^V$  в зависимости от угла падения поперечной волны  $\beta$

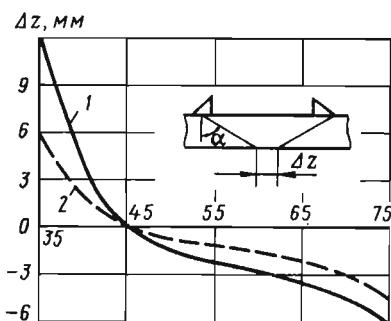


Рис. 16.74. Изменение величины смещения  $\Delta z$  от угла ввода поперечной волны:  
1 –  $f = 1,8 \text{ МГц}$ ; 2 –  $f = 2,5 \text{ МГц}$

критическому, тем больше амплитуда неоднородной волны. Коэффициент отражения горизонтально поляризованной поперечной волны независимо от угла падения равен единице. Поэтому использование такой волны при выявлении дефектов предпочтительно.

**Дифракция УЗ.** В основе большинства способов, которые применяют в практической УЗ дефектоскопии, лежит использование законов так называемой геометрической оптики (ГО). Это означает, что звуковые лучи распространяются по прямым линиям, а если попадают на границу раздела, то на ней происходят явления, описываемые законом Снеллиуса.

Однако существуют такие области на границах раздела двух сред (в частности, в областях на несплошностях в объекте контроля), а также такие условия взаимодействия УЗ волны с объектом, когда возникающие явления невозможно объяснить только законами ГО. Так, если при распространении УЗ колебаний на их пути встречается звуконепроницаемое препятствие, то по законам ГО за ним должна возникнуть область, куда не проникает звуковое поле, т.е. область звуковой тени. Но на самом деле в зависимости от соотношения размеров этого препятствия и длины волны на некотором расстоянии за ним в области геометрической тени обнаруживаются звуковые волны, т.е. звук как бы огибает препятствие. Данное свойство звуковых волн получило название «дифракция».

**Дифракция** – это явление частичного огибания волнами препятствий, находящихся на пути их распространения.

Для объяснения этого явления воспользуемся принципом Гюйгенса, в соответствии с которым каждую частицу среды, приходящую в колебание вследствие распространения первичной волны, можно рассматривать как точечный источник, излучающий вторичную

элементарную сферическую волну. Результирующей бесконечного числа таких элементарных сферических волн, дающей фактически существующую волну, является огибающая всех вторичных волн.

Так, если плоская волна встречает на своем пути звуконепроницаемую преграду с точечным отверстием, то она распространяется по другой стороне преграды в виде сферических волн, расходящихся от отверстия преграды как от нового точечного источника (рис. 16.75, а).

Если на пути распространения УЗ колебаний имеется препятствие, то колеблющиеся частицы среды, расположенные по краям препятствия, создают сферические волны, которые распространяются в зоне геометрической тени препятствий (см. рис. 16.75, б).

Дифракция проявляется в очень сильной степени, если размеры преграды невелики по сравнению с длиной звуковой волны. Если размеры препятствия равны длине волны или меньше ее, то лучи огибают препятствие, несколько рассеиваются и значительного отражения в этом случае не наблюдается.

В современной УЗ дефектоскопии под дифракцией понимают такие особенности распространения УЗ волн и их взаимодействия с границами разделов, которые не могут быть объяснены законами ГО.

Для практической дефектоскопии наибольшее значение имеют четыре случая, или четырех типа дифракции.

1. **Первый тип дифракции** возникает при взаимодействии УЗ волн с острыми краями несплошностей, в частности с краями трещин (рис. 16.76, а). В этом случае край трещины становится вторичным излучателем, работает как точечный источник и возбуждает сферическую УЗ волну. Вследствие этого трещина, даже неблагоприятно ориентированная по отношению к УЗ лучу, при достаточной чувствительности может быть выявлена УЗ контролем. Использование этого типа дифракции для определения высоты трещины см. в разд. 16.4.6.

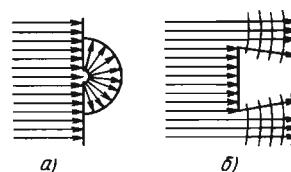


Рис. 16.75. К пояснению понятия «дифракция»:  
а – прохождение УЗ колебаний через малое отверстие; б – огибание волнами препятствий с заходом их в область геометрической тени

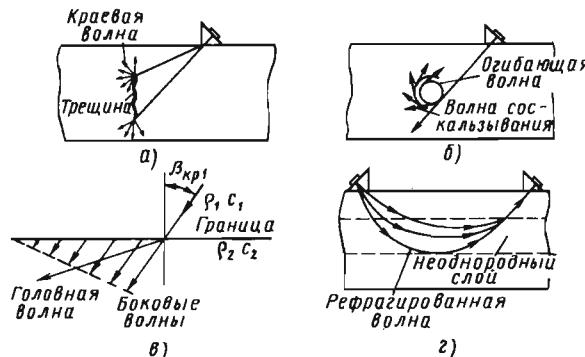


Рис. 16.76. Типы дифракции в твердых телах

2. Второй тип дифракции имеет место в тех зонах объектов, где УЗ лучи касаются гладких поверхностей (см. рис. 16.76, б). В этом случае формируются волны, огибающие поверхности тел, которые, в свою очередь, порождают дифракционные волны соскальзывания. Существуют методики, использующие этот тип дифракции для измерения периметра объемных дефектов. При этом сравнивают время прохождения сигнала, отраженного от несплошности, и дифрагированного сигнала, обежавшего часть несплошности и соскользнувшего с нее.

3. Третьим типом дифракции называют явления, возникающие при падении волн на границу раздела двух сред или на свободную границу среды под первым, вторым или третьим критическим углом (см. рис. 16.76, в). При этом образуются головные волны, которые, в свою очередь, порождают семейство дифракционных боковых волн в обеих средах.

4. Четвертый тип дифракции возникает в тех случаях, когда в среде имеются слои с различными скоростями УЗ волны. При наклонном падении УЗ волны на границы раздела таких слоев лучи отклоняются от прямолинейного направления распространения (см. рис. 16.76, г). Это явление известно под названием рефракции. Этот тип дифракции нашел практическое применение для измерения толщины поверхностно-закаленных слоев металла, например в валках холодной прокатки, где в поверхностном слое скорость звука изменяется в зависимости от глубины слоя.

Волны дифракции в контролируемом объекте присутствуют всегда. При отражении от плоскостных либо объемных дефектов возникают краевые волны, или волны обегания-соскальзывания, или головные и боковые волны. Чаще всего наблюдается совокупность дифрагированных волн нескольких типов. Вблизи свободной поверхности головные и

боковые волны также присутствуют всегда, поскольку, под каким бы углом волны ни излучались в твердом теле, вследствие конечных размеров преобразователей всегда найдутся лучи, которые направлены вдоль и вблизи свободной поверхности.

Однако при реализации обычных методов УЗ контроля, когда принимаемый сигнал соответствует геометрооптическому отражателю от дефектов, импульсы дифрагированных волн либо представляют собой ложные сигналы, либо вследствие неоптимального их излучения и приема пренебрежимо малы и не принимаются во внимание.

Между тем, знание законов возбуждения и распространения дифрагированных волн позволяет решить ряд задач УЗ контроля, которые обычными методами контроля решить крайне сложно либо нельзя. К ним можно отнести распознание типа дефекта и измерение его размеров, выявление сигналов на фоне шума в некоторых сварных швах, измерение глубины закаленных слоев и др.

Рассмотренные выше основные свойства взаимосвязаны, и в общем случае математически эта взаимосвязь описывается уравнением акустического тракта.

#### 16.4.3. АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ СОВМЕЩЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Акустическим трактом УЗ дефектоскопа называют путь УЗ импульса от излучателя до отражателя и затем – обратно к приемнику УЗ. При расчете акустического тракта ставится задача: определить амплитуду сигнала от дефекта в зависимости от свойств материала, формы и размера пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), дефекта и их взаимного расположения. Вначале рассмотрим акустическое поле ПЭП.

Акустическое поле вблизи излучателя вследствие интерференции имеет сложную структуру с чередующимися минимумами и максимумами звукового давления как вдоль, так и поперек акустической оси излучателя (рис. 16.77). Эта зона *немонотонного изменения акустического поля называется ближней зоной, или зоной дифракции Френеля*. Непосредственно на излучателе существует какое-то среднее давление  $P_0$ . Вдоль оси излучателя располагаются максимумы и минимумы давления, колеблющиеся около средней величины.

Давление, создаваемое УЗ волной на акустической оси круглого излучателя на расстоянии  $r$  от его поверхности, может быть определено по формуле

$$\frac{P}{P_0} = \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda(\sqrt{a^2 + r^2} - r)} \right|. \quad (16.23)$$

Число максимумов составляет  $2a/\lambda$  ( $2a$  – диаметр излучателя). Максимумы располагаются на расстояниях  $r = a^2 / [(2n+1)\lambda]$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), а минимумы при  $r = a^2 / 2n\lambda$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Звуковое удаление вдоль оси колеблется от нуля до удвоенного среднего. С удалением от источника расстояние между максимумами и минимумами увеличивается, а крутизна кривых изменения давления уменьшается. Примерно в точке  $N/2$  еще находится глубокий минимум, после чего в точке  $N$  (при  $n=0$ ) будет последний максимум с давлением, равным удвоенному среднему.

Акустическое поле в сечениях, расположенных поперек акустической оси излучателя, имеет вид чередующихся кольцевых зон минимумов и максимумов.

С удалением от источника ширина минимумов и максимумов увеличивается, вокруг них могут появиться дополнительные максимумы.

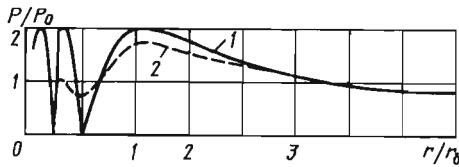


Рис. 16.77. Акустическое поле на оси круглого ПЭП:

- 1 – непрерывное излучение;
- 2 – импульсное излучение

В ближней зоне  $>80\%$  излученной энергии находится в пределах цилиндра, ограниченного краями излучателя, однако по сечению цилиндра энергия распределена неравномерно. Граница ближней зоны при непрерывном излучении УЗ определяется формулой

$$N = \frac{4a^2 - \lambda^2}{4\lambda}, \text{ а при } \lambda \ll a, N = \frac{a^2}{\lambda}. \quad (16.24)$$

За пределами ближней зоны начинается *далняя зона излучателя, или зона дифракции Фраунгофера*. В этой зоне звуковое давление монотонно убывает с увеличением расстояния от излучателя. В дальней зоне поле имеет вид лучей, выходящих из центра излучателя. На расстоянии  $r > 3N$  кривая, показывающая изменение давления в звуковой волне с расстоянием, приближенно следует закону

$$\frac{P}{P_0} \approx \left| 2 \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right| \approx \frac{\pi a^2}{\lambda r} = \frac{S_a}{\lambda r}, \quad (16.25)$$

где  $S_a$  – площадь излучателя.

Как видно, на большом расстоянии давление не испытывает осцилляций, а монотонно убывает обратно пропорционально расстоянию.

*Акустическое поле* в дальней зоне характеризуют диаграммой направленности, показывающей изменение звукового давления в зависимости от угла между направлением луча и акустической осью на постоянном расстоянии от излучателя (рис. 16.78). За единицу принимают амплитудное давление  $P_a$  на оси излучателя. Диаграмма направленности не зависит от расстояния до излучателя.

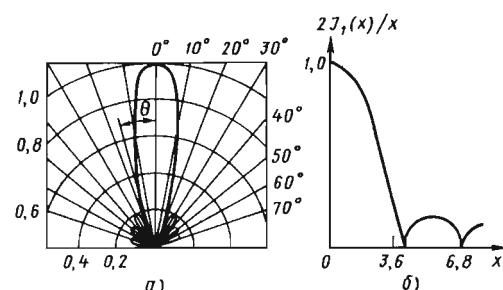


Рис. 16.78. Диаграмма направленности поля излучения круглого излучателя в полярных (а) и декартовых (б) координатах

Центральную часть диаграммы направленности, в пределах которой амплитуда поля уменьшается от единицы до нуля, называют **основным лепестком**. В пределах основного лепестка сосредоточено ~85 % энергии поля излучения. Вне основного лепестка диаграмма направленности имеет ряд боковых лепестков. Уровень последних определяется отношением поля на акустической оси к максимальной величине поля вне основного лепестка. Диаграмма направленности при  $r > 3r_b$  для круглого излучателя находится по формуле

$$\frac{P}{P_a} = 2 \frac{I_1(x)}{x}, \quad (16.26)$$

где  $x = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta$ ;  $I_1(x)$  – функция Бесселя,

значение которой берется из таблиц. Угол раскрытия основного лепестка диаграммы

$$\theta_0 = \arcsin 0,61\lambda/a = \arcsin 0,61c/f_a. \quad (16.27)$$

В практике УЗ контроля иногда определяют угол раскрытия основного лепестка на уровнях, отличающихся от нулевого. На уровне 20 дБ (или уровень 0,1 от максимума)

$$\theta_{0,1} = \arcsin 0,54\lambda/a. \quad (16.28)$$

На уровне 6 дБ (или уровень 0,5 от максимума)

$$\theta_{0,5} = \arcsin 0,35\lambda/a. \quad (16.29)$$

На уровне 3 дБ (или уровень 0,7 от максимума)

$$\theta_{0,7} = \arcsin 0,25\lambda/a. \quad (16.30)$$

Следующий этап при расчете акустического тракта состоит в расчете отражения падающего поля от дефекта.

Реальные дефекты могут иметь самые разные форму, ориентацию и акустические свойства, которые заранее неизвестны, поэтому формулы акустического тракта выводят обычно для моделей дефектов, имеющих простую геометрическую форму. В качестве отражателя примем отверстие с плоским дном, как наиболее удобное для расчета.

Отраженное поле для такого отражателя, точно так же как и поле излучения, полностью

описывается интегралом Кирхгофа. Поле отражения можно представить как результат излучения некоторыми вторичными (мнимыми) источниками на поверхности отражателя с амплитудой, равной амплитуде падающей волны, умноженной на коэффициент отражения  $R$  для полого диска при нормальном падении на него волны  $R = 1$ .

С учетом сказанного для плоскостного отражателя размером  $2b$  ослабление сигнала  $P_b$  на пути  $r_2$  до приемника описывается формулой (16.25) с заменой подстрочных индексов  $a$  на  $b$ :

$$P_b / P_0 = (S_b / \lambda r) \Phi_b. \quad (16.31)$$

При  $\theta = 0$ ,  $\Phi_b = 1$  и  $P_b / P_0 = S_b / \lambda r$ .

Эти формулы справедливы при нормальном падении волны на отражатель. В общем случае волна падает на отражатель под углом  $\beta$ . При этом отраженное поле формируется эквивалентной апертурой, представляющей собой проекцию площади отражателя на плоскость, перпендикулярную к оси отраженного поля. Апертура дискообразного отражателя – это площадь эллипса с полуосами  $b$  и  $b \cos \beta$ . Следовательно, в формуле (16.31) вместо  $S_b$  следует подставлять  $\pi b^2 \cos \beta = S_b \cos \beta$ , где  $\beta$  – угол падения на дефект.

Отраженное поле объемных отражателей с криволинейной формой поверхности может быть также рассчитано на основе формулы Кирхгофа. При этом интегрирование проводится по той же части поверхности отражателя, которая одновременно «освещается» из центров излучателя и приемника.

Ослабление сигнала вследствие затухания происходит по закону  $e^{-2\delta r}$ , где  $r$  – суммарный путь УЗ от преобразователя до дефекта.

Полученные формулы позволяют рассчитать акустический тракт. Например, для случая контроля в дальней зоне прямым совмещенным преобразователем в контактном варианте формула акустического тракта для диска будет

$$\frac{P_b}{P_0} = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2} e^{-2\delta r}. \quad (16.32)$$

Коэффициенты  $R$  и  $D$  для данного случая равны единице. Из формулы (16.31) видно, что амплитуда отраженного сигнала от плоскодонного отражателя пропорциональна его площади.

При выводе уравнения акустического тракта наклонного преобразователя применяют теорию мнимого излучателя. Эта теория исходит из предложения, что в области угла падения  $\beta_{\text{кр1}} \leq \beta \leq \beta_{\text{кр3}}$  УЗ поле формируется в однородной упругой среде от мнимого излучателя, размеры которого можно принять равными  $2a \cos \alpha_0 / \cos \beta$  в плоскости падения. С учетом сказанного акустический тракт наклонного совмещенного преобразователя будет следующим

$$\frac{P_b}{P_0} = \tilde{D}_t(\beta) \frac{S_a (\cos \alpha_0 / \cos \beta) S_b}{\lambda_t^2 (r + \Delta r)^2} e^{-2(\delta_1 n + \delta_2 r)}, \quad (16.33)$$

где  $r_1$  – средний путь УЗ в призме;  $r$  – расстояние от точки вывода до дефекта;

$$\Delta r = r_1 \frac{c_{l1}}{c_t} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} - \quad (16.34)$$

приведенный путь в призме искателя;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – коэффициенты затухания в призме искателя и в изделии соответственно;  $D_t$  – коэффициент прохождения через границу.

Формулы акустического тракта наклонного искателя для наиболее распространенных искусственных отражателей приведены в табл. 16.4. Дополнительные данные, необходимые при расчете акустического тракта, представлены в табл. 16.5.

#### 16.4.4. МЕТОДЫ

Из большого многообразия методов акустического контроля для контроля сварных швов рассматриваемых строительных конструкций применяют эхометод, теневой, зеркально-теневой, эхозеркальный и дельта-методы. Кратко рассмотрим характеристики этих методов.

#### 16.4. Поле излучения-приема в дальней зоне для различных отражателей, расположенных на акустической оси пучка

Вид отражателя	Вид преобразователя	
	прямой	наклонный
Диск площадью $S_b = \pi_n^2$ (плоскодонное отверстие)	$P = K \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2} e^{-\delta}$	$P = K \frac{S_a S_b \cos \alpha}{\lambda^2 (r + r_0)^2 \cos \beta} e^{-\delta}$
Сфера диаметром $d$	$P = K \frac{S_a d}{4\lambda r^2} e^{-\delta}$	$P = K \frac{S_a d \cos \alpha}{4\lambda (r + r_0)^2 \cos \beta} e^{-\delta}$
Бесконечная полоса шириной $d$	$P = K \frac{S_a d}{\sqrt{2}(\lambda r)^{3/2}} e^{-\delta}$	$P = K \frac{S_a d \cos \alpha}{\sqrt{2}[\lambda(r + r_0)]^{3/2} \cos \beta} e^{-\delta}$
Бесконечный цилиндр диаметром $d = 2b_{\text{ц}}$ (боковой цилиндрический отражатель)	$P = K \frac{S_a}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3}} e^{-\delta}$	$P = K \frac{S_a \cos \alpha}{\lambda \cos \beta} \sqrt{\frac{d}{8(r + r_0)^3}} e^{-\delta}$
Бесконечная плоскость (донный сигнал)	$P = K \frac{S_a}{2\lambda r} e^{-\delta}$	$P = K \frac{S_a \cos \alpha}{r \lambda} \frac{1}{\cos \beta (r + r_0)} e^{-\delta}$
Цилиндрическая вогнутая поверхность	$P = \left( \frac{S_a}{2\lambda r} \right)^{1/2} e^{-\delta}$	$P = \left[ \frac{S_a \cos \alpha}{2\lambda(r + r_0) \cos \beta} \right]^{1/2} e^{-\delta}$

## 16.5. Основные акустические характеристики материалов

Вещество	Скорость звука, м/с		Длина волны $\lambda$ , мм при $f = 2,5$ МГц		Плотность среды $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Акустическое сопротивление $z$ , $1 \cdot 10^6$ г/(см · с)		Коэффициент затухания продольных волн на частоте $2,5$ МГц, $1 \cdot 10^2$ м <sup>-1</sup>
	$c_l$	$c_t$	$\lambda_l$	$\lambda_t$		продольное	поперечное	
Дюралюминий	6260	3100	2,50	1,24	2,70	1,69	0,84	0,001...0,05
Бериллий	12800	8170	5,12	3,48	1,82	2,33	1,59	—
Вольфрам	5180	2870	2,07	1,15	19,25	9,97	5,52	—
Вода	1490		0,60		1,00	0,15		0,018...0,044
Воздух	331	—	0,13	—	0,0013	4,10	—	0,01...0,08
Глицерин	1923		0,77		1,265	0,24		0,06...0,15
Кварцевое стекло	5700	3400	2,28	1,36	2,60	1,48	0,88	0,00004
Магний		3050	2,31	1,22	1,74	1,00	0,53	—
Масло трансформаторное	1380	—	0,55	—	0,90	0,12	—	0,65
Медь	4660	2260	1,86	0,90	8,90	4,15	2,01	0,58
Оргстекло	2670	1121	1,07	0,45	1,18	0,32	0,13	—
Полистирол	2370	1120	0,95	0,45	1,10	0,26	0,12	2,5
Сталь углеродистая	5900	3260	2,36	1,30	7,80	4,60	2,54	
Сталь коррозионно-стойкая	5660	3120	2,26	1,25	8,03	4,54	2,51	
Титан	6000	3500		1,40	4,50	2,70	1,58	
Шлак (спекшийся флюс) АН-348		2400	2,40	0,96	3,30	1,98	—	
Шлак (спекшийся флюс) 48-АФ-1	4000	1600	1,60	0,64	2,50	1,00		

**Эхометод** (рис. 16.79). Он основан на регистрации эхосигнала, отраженного от дефекта. Кроме преимущества одностороннего доступа он также обладает наибольшей чувствительностью к выявлению внутренних дефектов ( $S_{\min}^{\text{плоск}} \approx 0,5$  мм<sup>2</sup> и  $2b \approx 0,8$  мм), высокой точностью определения координат дефектов. К недостаткам метода следует отнести прежде всего низкую помехоустойчивость к наружным отражателям, большую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта (кривая 2, на рис. 16.80). Этим методом контролируют ~90 % всех сварных соединений толщиной  $\geq 4$  мм.

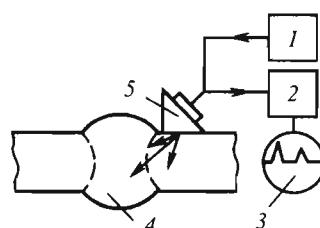


Рис. 16.79. Контроль эхометодом:  
1 – генератор; 2 – усилитель;  
3 – индикатор; 4 – объект контроля;  
5 – преобразователь

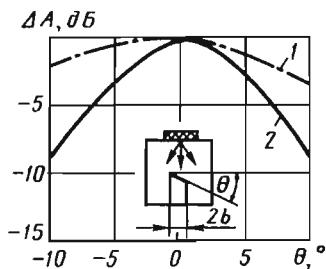


Рис. 16.80. Изменение амплитуды сигнала от ориентации дефекта при  $f = 1,8$  МГц:  
1 –  $2b = 6$  мм; 2 –  $2b = 4$  мм

**Теневой метод.** При теневом методе контроля о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды УЗ колебаний, прошедших от излучателя к приемнику (рис. 16.81). Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала. Излучатель и приемник УЗ располагают при этом соосно на противоположных поверхностях изделия. Теневой метод можно применять только при двустороннем доступе к изделию. При ручном контроле этим методом можно контролировать сварные швы ограниченного сечения небольшой толщины.

К преимуществам теневого метода следует отнести: низкую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта (кривая 1 на рис. 16.80), высокую помехоустойчивость и отсутствие мертвых зон. Благодаря первому преимуществу этим методом уверенно обнаруживаются наклонные дефекты, не дающие прямого отражения при эхометоде. Недостатками метода являются: сложность ориентации ПЭП относительно центральных лучей диаграммы направленности, невозможность точной оценки координат дефектов и более низкая чувствительность (в 10–20 раз) по сравнению с эхометодом.

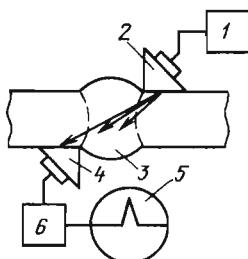


Рис. 16.81. Контроль теневым методом:  
1 – генератор; 2, 4 – ПЭП; 3 – шов;  
5 – электронно-лучевая трубка (ЭЛТ); 6 – усилитель

**Эхозеркальный метод** (рис. 16.82) наиболее достоверен при обнаружении плоскостных вертикально ориентированных дефектов. Он реализуется при прозвучивании шва двумя ПЭП, которые перемещаются по поверхности ОШЗ с одной стороны шва таким образом, чтобы фиксировать одним ПЭП сигнал, излученный другим ПЭП и дважды отразившийся от дефекта и противоположной поверхности изделия. Этим методом контролируют изделия с эквидистантными поверхностями, а если их толщина <40 мм, то необходимы специальные ПЭП.

Одно из основных преимуществ метода – возможность оценки формы дефектов размером  $\geq 3$  мм, которые отклонены в вертикальной плоскости не более чем на  $\theta \leq 10^\circ$ . При оценке формы дефектов необходимым условием является использование ПЭП одинаковой чувствительности. Метод нашел широкое применение при контроле толстостенных изделий, когда требуется высокая надежность обнаружения вертикально ориентированных плоскостных дефектов, а также при арбитражных оценках.

**Зеркально-теневой метод** (рис. 16.83). При зеркально-теневом методе признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности (ее обычно называют донной) изделия. Дополнительными преимуществами этого метода по сравнению с теневым являются односторонний доступ и более уверенное обнаружение дефектов, расположенных в корне шва. Оба эти метода нашли широкое применение при контроле сварных стыков арматуры.

**Дельта-метод.** Здесь (рис. 16.84) используется УЗ энергия, переизлученная дефектом. Падающая на дефект поперечная волна частично отражается зеркально, частично трансформируется в продольную, а частично переизлучает дифрагированную волну. Трансфор-

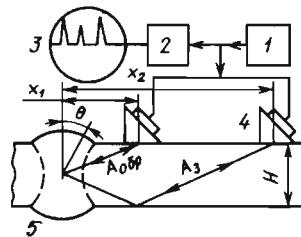


Рис. 16.82. Контроль эхозеркальным методом:  
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – ЭЛТ;  
4 – ПЭП; 5 – шов

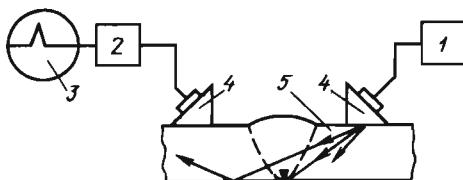


Рис. 16.83. Контроль зеркально-теневым методом.  
Обозначения см. на рис. 16.82

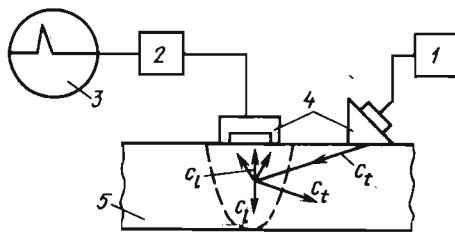


Рис. 16.84. Контроль дельта-методом.  
Обозначения см. на рис. 16.82

мированная продольная волна распространяется нормально к нижней поверхности, отражается от нее и улавливается прямым ПЭП. Этим же ПЭП будет улавливаться компонента продольной дифрагированной волны, срывающейся с верхнего кончика трещины и распространяющейся вертикально вверх. Недостатки метода – необходимость зачистки шва, сложность расшифровки принятых сигналов при контроле соединений толщиной  $\leq 15$  мм, трудности при настройке чувствительности и оценке величины дефектов.

Наиболее достоверные результаты получают, если применяют стандартные образцы предприятия (СОП) с реальными дефектами. Применение СОП с искусственными дефектами, имитирующими трещины, может привести к ложным результатам. Это связано с тем, что искусственные дефекты имеют с торца сравнительно большую отражающую поверхность, поэтому процессы рассеяния УЗ колебаний от искусственных дефектов могут очень отличаться от реальной картины рассеяния.

Из перечисленных методов контроля, при которых необходимо применять два ПЭП, один из которых выполняет функции излучателя, другой – приемника, схему включения называют *раздельной*. Когда используется один ПЭП, то он выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхосигналов, и такая схема называется *совмещенной*. При эхозеркальном методе ПЭП включены по

совмещенной схеме, а также принимают сигналы по раздельной схеме. В этом случае схема называется *раздельно-совмещенной*.

**Акустико-эмиссионный метод.** Акустическая эмиссия, или эмиссия волн напряжения, – явление генерации упругих волн в твердых телах и при нагружении (рис. 16.85). Главным источником акустической эмиссии следует считать процессы разрушения в кристаллах и скоплениях кристаллов. При этом могут образовываться микро- и макротрешины. Излучаемые при этом импульсы упругих волн в зависимости от материала имеют широкий частотный диапазон – от десятков до сотен мегагерц.

Основными параметрами, характеризующими акустическую эмиссию, являются:

- число зарегистрированных импульсов дискретной акустической эмиссии за время наблюдения;
- число зарегистрированных превышений импульсами акустической эмиссии установленного уровня ограничения за время наблюдения;
- отношение числа импульсов акустической эмиссии к интервалу времени наблюдения (активность акустической эмиссии);
- энергия, выделяемая источником акустической эмиссии и переносимая упругими волнами, возникающими в материале;
- энергия сигнала акустической эмиссии, выделяемая в месте измерения или наблюдения.

Для контроля методом акустической эмиссии обычно применяют многоканальную аппаратуру. Каждый канал соединен со своим преобразователем, принимающим упругую

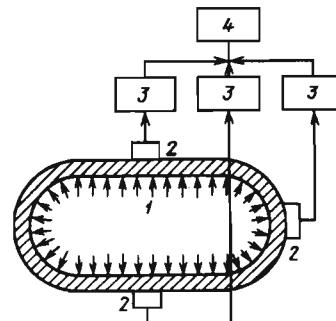


Рис. 16.85. Акустико-эмиссионный метод контроля:

1 – объект контроля; 2 – приемник; 3 – усилители;  
4 – блок обработки информации с индикатором

волну из изделия по определенной системе. Блоки обработки сигналов ведут счет принимаемых сигналов за короткий интервал времени (например, за 0,1 с) и суммарную обработку сигналов от всех каналов многоканальной системы. Исследуют также амплитудное распределение принимаемых сигналов и энергию эмиссии за единицу времени или за весь период испытаний.

Аппаратура включает в себя блок определения местоположения источника сигналов. Для этого сравнивается время прихода сигнала акустической эмиссии не менее чем на три преобразователя.

В современных многоканальных системах акустической эмиссии для обработки поступающей информации применяют быстро действующую ЭВМ. Это позволяет: определять координаты источников акустической эмиссии, комплексно оценивать параметры сигналов, сравнивать количественные характеристики параметров с установленными браковочными критериями и вырабатывать решение о браковке контролируемого объекта.

Метод акустической эмиссии дает возможность не только обнаруживать опасные дефекты, но и прогнозировать работоспособность ответственных элементов конструкций (сосудов высокого давления, узлов атомных реакторов, деталей летательных аппаратов и т.д.).

#### 16.4.5. СРЕДСТВА УЗ КОНТРОЛЯ

К ним относят: дефектоскопы, набор ПЭП, содержащих пьезоэлементы для излучения и приема УЗ колебаний, и различные вспомогательные устройства.

УЗ дефектоскоп предназначен для генерирования импульсов УЗ колебаний, приема отраженных сигналов, преобразования этих сигналов к виду, удобному для наблюдения их на экране ЭЛТ и управления дополнительными индикаторами, а также для измерения координат дефектов и сравнения амплитуд сигналов.

Для достоверного контроля дефектоскоп, как минимум, должен обеспечивать:

- линейную пропорциональность между амплитудами эхосигнала на входе дефектоскопа и на индикаторе;

- получение максимальной информации о дефекте, точное измерение амплитуды и временных интервалов между зондирующими импульсом и эхосигналом от дефекта;

- селектирование эхосигналов из любого заданного временного интервала и автоматическую сигнализацию (звуковую, световую) об их наличии;

- выравнивание чувствительности дефектоскопа по всей зоне контроля для компенсации затухания УЗ в металле.

Дефектоскопы делятся на аналоговые и процессорные. В состав последних входит процессор (компьютер) для управления и цифровой обработки информации, содержащейся в сигнале.

Сейчас в основном эксплуатируются аналоговые отечественные дефектоскопы УД2-12, Рельс-6, УДС2-РДМ-3 и зарубежные фирмы «Krautkrämer» (ФРГ), «Sonotest» (Великобритания), «Tosotest» (США) и др. Эти приборы имеют: улучшенные параметры схемы временного регулирования чувствительности, обеспечивающей максимальную равномерность выравнивания амплитуд сигналов в диапазоне зоны контроля величиной 10...180 мм  $\geq$  6 дБ; компенсированную схему отсечки шумов, разделение органов настройки и управления на настроочные и оперативные, что повышает эргономические характеристики прибора и достоверность контроля и т.п.

Рассмотренные дефектоскопы массового применения, к сожалению, не облегчают труд оператора, поскольку не освобождают его от многих операций, в том числе от таких, как вычисление эквивалентной площади и оценка допустимости дефекта. Снизить психофизиологическую нагрузку, повысить информативность контроля и, следовательно, его достоверность можно максимальной автоматизацией измерительных операций.

Принципиально новые возможности дает применение цифровой техники. Создание мощных процессоров малых размеров обеспечило активное совершенствование всей дефектоскопической техники, в том числе и УЗ дефектоскопов.

Здесь можно выделить три конструктивных направления. Одно из них – это создание дефектоскопов путем сочетания серийных ПЭВМ, прежде всего типа ноутбук, с соответствующим электронным блоком, содержащим генератор зондирующих импульсов и усилитель.

Преимуществами таких конструкций являются: гибкость управления, широкие возможности по обработке информации с решением нестандартных задач, возможность посто-

янного совершенствования программного продукта.

К недостаткам относятся: некомпактность конструкции; необходимость дополнительных операций в клавишном наборе при вызове соответствующей программы, что приводит к временным затратам; невозможность использования в полевых или загрязненных цеховых условиях.

Дефектоскопы, развивающиеся по второму направлению, конструктивно выполнены в виде моноблока, а программное обеспечение, записанное на дискетах или флэш-дисках, заменяется в зависимости от задач контроля [«Hitachi-2200» (Япония) и «Epoch» (США)]. Преимуществами этих дефектоскопов являются: минимальное число клавиш управления, гибкость в перестройке программ, независимость сложности конструкции и габаритных размеров от числа и сложности решаемых задач.

Безусловно, дефектоскопы этой конструкции имеют большие перспективы в ближайшем будущем, когда в штатные задачи дефектоскописта войдет не только дефектометрия, но и оценка годности и эксплуатационного ресурса изделия (узла), выполняемая на основе автоматического сравнения совокупности информативных признаков дефекта с заложенными в память многопараметрическими нормами качества и соответствующими формулами расчета на прочность для данного конкретного объекта контроля. Кроме того, такие дефектоскопы, имеющие банк программ, могут решать и широкий спектр задач по анализу физико-механических свойств металла.

Недостатками дефектоскопов подобного рода являются наличие сложных конструктивных элементов и ограниченные возможности для миниатюризации.

Наибольшее развитие получили процессорные дефектоскопы со встроенным процессором и заданным программным обеспечением. Это понятно, поскольку такой подход позволяет максимально уменьшить габаритные размеры прибора, упростить управление и при этом обеспечить высокие прочностные и другие эксплуатационные качества, необходимые при ручном контроле.

К этой группе дефектоскопов следует отнести СК-1 (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и УД-201П (ЦНИИТмаш).

Портативный дефектоскоп-томограф СК-1 в отличие от известных отечественных и зарубежных аналогов помимо общезвестных функций (измерение размеров и координат

дефектов) обеспечивает оценку конфигурации дефектов и слежение за качеством акустического контакта. При использовании СК-1 не требуется специальных образцов для настройки чувствительности. В памяти прибора «зашито» ~180 методик УЗ контроля. Наличие в составе прибора удобного трехмерного УЗ датчика положения преобразователя позволяет обеспечивать заданную методикой траекторию сканирования объекта, восстанавливать двух- и трехмерные томографические изображения дефектов.

**Автоматическая расшифровка результатов**, осуществляемая в реальном масштабе времени, является существенной составляющей обеспечения безопасного функционирования ответственных объектов. Главное преимущество дефектоскопов общего назначения – возможность их применения для контроля широкого класса объектов, хотя сама процедура контроля сложна. Специализированные дефектоскопы отличаются высокой эффективностью и простотой контроля объектов своего назначения, однако номенклатура таких объектов невелика. Благодаря мультипрограммной организации СК-1 может содержать до восьми независимых виртуальных специализированных приборов УЗ контроля. Это позволяет существенно повысить достоверность и производительность контроля, а значит, – и экономическую эффективность применения СК-1.

Простота управления прибором, высокая надежность в работе, отсутствие дополнительных требований к квалификации операторов позволяют немедленно приступить к внедрению СК-1 на любом предприятии без дополнительных затрат.

Среди зарубежных ручных процессорных дефектоскопов наиболее эффективны USM52P и USM25 фирмы «Krautkrämer» (ФРГ) и «Epoch» фирмы «Panametric» (США), «Sonic» фирмы «Nomicon» (Италия).

Применение процессорных дефектоскопов существенно облегчает труд и снижает психофизиологическую нагрузку на оператора, поскольку освобождает его от большинства измерительных операций; повышает производительность контроля за счет резкого сокращения (в десятки раз) времени на настроечные операции при переходе с одного объекта на другой и, самое главное, повышает достоверность контроля. Последнее в первую очередь определяется новыми возможностями этих дефектоскопов, такими как:

- «заморозка» (накопление) сигнала и измерение максимальных параметров сигнала в данном режиме при многократном сканировании дефекта;
- настройка дефектоскопа в камеральных условиях, что снижает уровень ошибок;
- задание через меню времени прохождения УЗ контроля в призме, что повышает точность измерения координат;
- одновременное измерение двух координат дефекта, что необходимо при контроле сложных геометрических объектов, например угловых швов врезки «труба в трубу»;
- запоминание осциллограммы дефектного участка и его анализ в камеральных условиях с привлечением специалистов более высокого уровня;
- архивирование результатов контроля (осциллограмм и комментариев к ним) на ПЭВМ для дальнейшего мониторинга за поведением дефектов, оставшихся в конструкции.

Одним из основных недостатков УЗ контроля традиционным ручным методом является то, что после него не остается объективных документов (дефектограмм), по которым можно было бы контролировать работу самих операторов. Это обуславливает зависимость оценки качества шва от квалификации, психофизиологического состояния и условий работы оператора. Иными словами, можно констатировать, что достоверность ручного контроля почти целиком определяется персональной надежностью оператора. Поэтому очевидна необходимость автоматизации УЗ контроля.

Автоматизация УЗ контроля развивается по пути многофункциональности и роботизации операций сканирования и измерения. Быстро действующие средства контроля создаются на основе применения аналоговых и цифровых методов обработки многомерного сигнала, а также многоканальных акустических систем с одновременным или коммутируемым действием. В координатах амплитуда – частота – время строятся двух- и трехмерные изображения акустических полей, что позволяет оценивать тонкую структуру отражающей поверхности.

Механизированное сканирование позволяет облегчить труд оператора, исключить ошибки, связанные с несоблюдением регламента сканирования при поиске дефектов, а в некоторых случаях – даже повысить общую производительность контроля (с учетом подготовительно-вспомогательных операций).

Для дефектоскопии протяженных сварных стыковых соединений металлоконструкций толщиной 4...40 мм эффективно используется автоматизированная установка «Сканер-9312».

Механизм сканирования установки состоит из восьмиканального акустического блока на магнитных колесах, электродвигателя, датчиков пройденного пути и слежения за сварным швом и емкости для контактной жидкости.

В состав установки входят восьмиканальный дефектоскоп, принтер и аккумуляторные батареи. Установка обеспечивает контроль со скоростью 1 м/мин.

С 2002 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана проводится портативный восьмиканальный мультипрограммный дефектоскоп СК-2, предназначенный для автоматического, механизированного или ручного УЗ контроля. СК-2 рассчитан на измерение основных параметров дефектов: амплитуды эхосигналов, координат дефектов, их эквивалентной площади и высоты, а также на определение типа дефектов. СК-2 позволяет сохранять результаты контроля в процессе его проведения и документировать результаты по завершении контроля.

Маленькая масса, небольшие габаритные размеры, большой динамический диапазон и простота управления дают возможность успешно применять СК-2 в атомной и других отраслях промышленности для контроля как металлических, так и неметаллических объектов. Благодаря хорошо защищенному ударо-прочному корпусу и встроенному источнику питания СК-2 может использоваться для контроля стыковых сварных соединений трубопроводов, сварных конструкций другого назначения в самых труднодоступных местах.

Один из наиболее важных элементов программного обеспечения СК-2 – возможность слежения за качеством акустического контакта во всех каналах одновременно, что значительно повышает достоверность результатов контроля. Существенной составляющей обеспечения безопасного функционирования ответственных объектов является своевременная и правильная расшифровка результатов контроля. В отличие от подавляющего большинства современных приборов в СК-2 результаты расшифровываются автоматически в реальном масштабе времени.

Автоматическая установка «Автоконтроль МГТУ» предназначена для УЗ контроля качества кольцевых сварных соединений трубопроводов диаметром 530...1420 мм с толщиной стенки 5...25 мм (рис. 16.86).



Рис. 16.86. Установка «Автокон-МГТУ» для автоматизированного УЗ контроля трубопроводов диаметром 530...1420 мм

Конструктивно она выполнена в виде двух блоков: электронного с принтером и механизма сканирования на магнитных колесах с электроприводом и акустическим блоком. Акустический контакт обеспечивается ферромагнитной жидкостью. Скорость контроля 1...2 м/мин. Общая масса установки  $\leq 20$  кг.

Преимуществом установки является отсутствие направляющих для передвижения сканера. Робот-сканер перемещается на магнитных колесах, а его направление по шву обеспечивается с высокой точностью ( $\pm 1$  мм) специальными датчиками слежения. Сканер может передвигаться в любом пространственном положении на расстоянии до 20 м от электронного блока. Обработка результатов осуществляется в реальном масштабе времени с изображением сечения изделия и возможных дефектов, а также указанием мест нарушения акустического контакта. Самое главное, на дефектограмме дается полная информация о дефекте (размер, форма, ориентация и координаты).

Установки сер. «Авгур» фирмы «ЭхоТ» (Москва) контролируют сварные швы трубопроводов в широком диапазоне толщин и диаметров на частотах 0,5...6 МГц. Результаты документируются в виде голограмм.

**Преобразователи.** Преобразователь является сложным электроакустическим прибором, состоящим из следующих основных элементов: собственно преобразователя упругих колебаний в электромагнитные, и наоборот; протектора (защитного донышка) или акустической задержки (призмы); демпфера; корпуса и токоподвода (рис. 16.87).

В качестве приемно-излучающего элемента в подавляющем большинстве случаев используют пластины из керамики (циркония, титаната свинца или титаната бария), обладающей пьезоэффектом, или (реже) пьезокварца X- и Y-срезов с металлизированными поверхностями-электродами.

Толщину  $d$  пьезоэлектрической пластины выбирают из условия, чтобы ее собственная частота соответствовала частоте возбужденных или принимаемых УЗ колебаний, т.е.  $d = \lambda_p / 2 = c_p / 2f_0$ , где  $\lambda_p$  и  $c_p$  – соответственно длина волны и скорость звука в материале пьезопластины;  $f_0$  – резонансная частота.

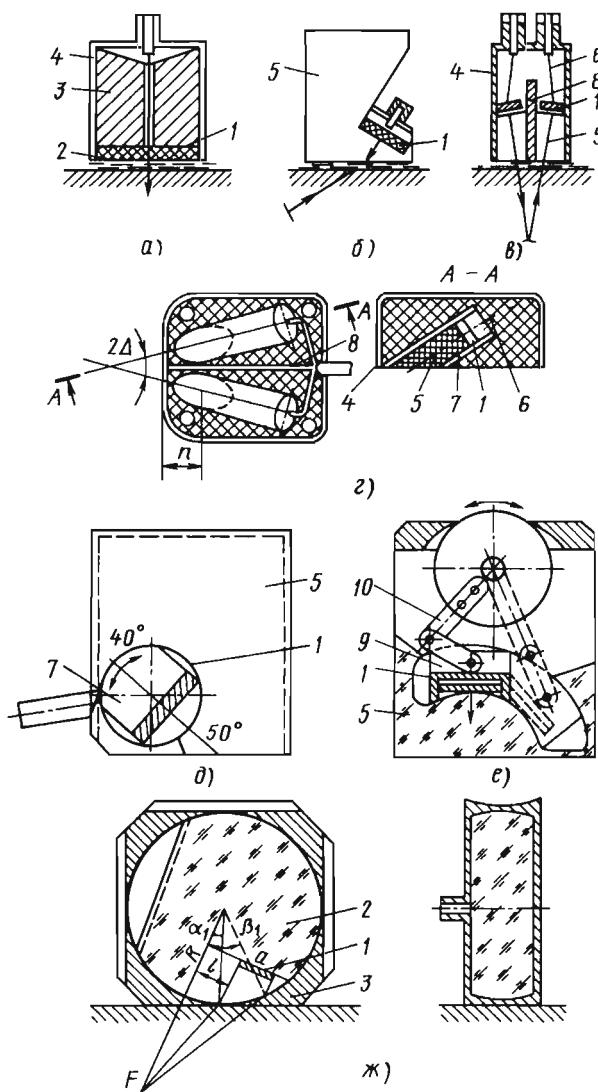
Для защиты пьезопластины в прямых ПЭП от повреждения к ней с рабочей стороны приклеивают (припаивают) металлическое или керамическое донышко – протектор. В раздельно-совмещенных и наклонных ПЭП пьезопластины приклеиваются к акустической задержке – призме, изготовленной обычно из оргстекла. С нерабочей стороны пьезопластины приклеивают демпфер из материала с большими акустическим сопротивлением и коэффициентом затухания (например, взвесь ферровольфрама или суртика в эпоксидной смоле).

Демпфер способствует гашению свободных колебаний пьезопластины и уменьшению длительности зондирующего импульса. В наклонных и раздельно-совмещенных преобразователях демпфер обычно выполняют из пробки или асбеста, он служит только для звукоизоляции от других деталей преобразователя.

Призма в наклонном ПЭП создает наклонное падение продольных волн на границу раздела с изделием. На этой границе волны трансформируются, в результате чего в изделие вводится требуемый тип волны, определяемый углом падения и соотношением скоростей звука в призме и изделии.

В раздельно-совмещенных прямых ПЭП призмы выбирают с углом 5...10°, она выполняет роль акустических задержек, что позволяет минимизировать мертвую зону. Для объективного контроля качества необходимо, чтобы средства неразрушающего контроля обеспечивали единство и воспроизводимость его результатов. Поэтому основные характеристики преобразователя нормируют.

Выбор ПЭП определяют исходя из конструкции сварного соединения, наиболее вероятного местоположения и ориентации дефекта, наличия ложных сигналов и т.п. Поэтому промышленность выпускает различные типы ПЭП.



**Рис. 16.87. Конструкции основных типов УЗ преобразователей:**  
 а – прямого; б – наклонного ИЦ-1; в – раздельно-совмещенного; г – типа «дуст» (МГТУ им. Н.Э. Баумана);  
 д – ИЦ-52 с поворотной вставкой (ЦНИИТмаш); е – ИЦ-17 с постоянной точкой ввода (ЦНИИТмаш);  
 ж – ИЦ-13 с фокусировкой (ЦНИИТмаш); 1 – пьезозлемент; 2 – протектор; 3 – демпфер; 4 – корпус;  
 5 – призма; 6 – высокочастотный кабель; 7 – вставка; 8 – электроакустический экран;  
 9 – ползун; 10 – рычажно-шарнирный механизм

Оптимальные параметры ПЭП должны рассчитываться с учетом:

- достижения максимальной чувствительности дефектоскопа;
- монотонной круговорастающей зависимости амплитуды эхосигнала от площади дефекта;

- высокой направленности, обеспечивающей возможность разрешения двух близко залегающих отражателей;
- уменьшения уровня помех;
- минимальных размеров мертвых зон и уровня реверберационных шумов в призме;
- стабильности акустического контакта.

При разработке наклонных ПЭП размеры, форму и материал призмы надо выбирать таким образом, чтобы они имели наилучшую реверберационно-шумовую характеристику (РШХ) и по возможности удовлетворяли следующим основным требованиям: обеспечивали эффективное затухание колебаний, переотраженных от границы раздела призма – изделие внутри призмы, и незначительно ослабляли пучок во время прямого прохождения. Кроме того, материал призмы должен обладать хорошими износостойкостью и смачиваемостью, значительным пределом термостабильности.

Наибольшее применение для изготовления призм нашли материалы на основе акрильных смол (оргстекло, полистирол и т.п.). Однако в последнее время все более широкое распространение получает технология отливки призм из эпоксидных компаундов.

Для улучшения РШХ призму делают ребристой или придают ей сложную форму; предусматривают специальные ловушки, изготовленные из материала с большим затуханием, но имеющим тот же импеданс, что и материал призмы.

Важным источником реверберационных шумов являются колебания, отраженные от рабочей поверхности. Во избежание этого оптимизируют высоту размещения пьезоэлемента в призме и величину стрелы.

При выборе размеров пьезоэлемента надо руководствоваться следующими соображениями. Увеличение поперечных размеров сужает характеристику направленности и повышает чувствительность в дальней зоне, однако увеличивает протяженность ближней зоны, характеризующейся неравномерной чувствительностью по глубине и сечению пучка и, следовательно, пониженной вероятностью обнаружения дефектов. Кроме того, увеличение габаритных размеров пьезоэлемента влечет за собой увеличение стрелы ПЭП и площади контактной поверхности, что снижает достоверность и воспроизводимость результатов контроля.

Размер и форма пьезоэлемента определяют также уровень и длительность собственных реверберационных шумов в нем вследствие радиальных колебаний и существенно влияют на форму сигнала. С этой позиции прямоугольная форма пьезоэлементов наименее выгодна.

В то же время пьезоэлемент малых размеров не обеспечивает необходимой мощности излучения, имеет недостаточную разрешающую способность и точность определения координат дефектов из-за широкой диаграммы направленности. По данным различных исследователей, можно считать, что при перерасчете на поперечные волны оптимальные размеры пьезопластин лежат в области  $af = 12 \dots 15 \text{ мм} \cdot \text{МГц}$ .

При выборе размеров пьезоэлемента наряду с изложенными соображениями необходимо учитывать, что при работе в ближайшей зоне снижается вероятность обнаружения дефектов и поэтому надо стремиться к тому, чтобы пьезоэлемент и дефект находились в их дальних зонах. Данное требование выполняется при соблюдении следующих условий:

$$a \leq \sqrt{0,8\lambda r} \quad \text{при } r \geq 8b^2/\lambda, \quad (16.35)$$

где  $r$  – приведенное расстояние между дефектом и пьезоэлементом.

Особенно сложные задачи стоят в создании ПЭП для контроля сварных швов малой толщины 3...5 мм. Необходимо предельно локализовать пучок, чтобы исключить ложные сигналы, вызванные отражением от усиления шва.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана впервые предложены специализированные раздельно-совмещенные хордовые ПЭП типа РСМП для контроля сварных швов трубопроводов диаметром 28...108 мм.

Принципиальной особенностью хордовых ПЭП является озвучивание дефекта горизонтально поляризованной (по отношению к плоскости дефекта) нерасходящейся поперечной  $SH$ -волной.

Основное преимущество применения  $SH$ -волн в отличие от  $SV$ -волн состоит в независимости коэффициента отражения их от угла падения на плоский отражатель, т.е. для них отсутствует третий критический угол и соответственно трансформация волн, что часто служит причиной появления ложных сигналов (рис. 16.88).

Широкое применение для контроля аустенитных сварных швов нашли наклонные раздельно-совмещенные ПЭП на продольные и поперечные волны, разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана (см. рис. 16.87).

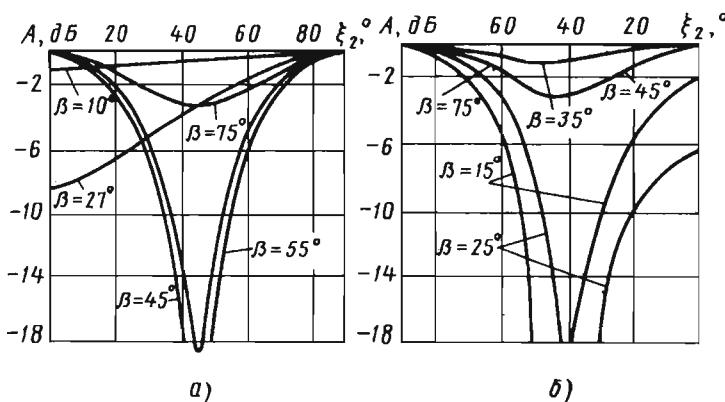


Рис. 16.88. Изменение амплитуды отраженного от плоскости сигнала в зависимости от взаимной ориентации плоскостей источника (a) и приемника (б):

$\xi_2$  – угол разворота между плоскостью поляризации и плоскостью падения, град

Раздельно-совмещенный ПЭП (см. рис. 16.87, б) для контроля продольными волнами состоит из двух пьезоэлементов 1, приклешенных к призмам из оргстекла 5, разделенных акустическими 8 и электрическими экранами и залитых демпфером на эпоксидной основе в корпусе 4. Излучатель И приклешен к призме, которая выше другой на величину  $c\tau_3$  ( $c$  – скорость УЗ волн в призме,  $\tau_3$  – длительность зондирующего импульса). Разная высота призм делается с целью уменьшения электрических помех на приемнике. Благодаря акустическому и электрическому разделению излучателя и приемника мертвая зона раздельно-совмещенного ПЭП незначительна (0,5...2 мм).

Разработаны и применяются на ряде заводов раздельно-совмещенные ПЭП без задержек (призм), а также с кварцевыми задержками. Последние используются при контроле изделий с температурой до 600 °C.

Раздельно-совмещенные ПЭП широко используют при контроле сварных тавровых соединений и стыковых соединений со снятой выпуклостью шва, а также для обнаружения расслоений в листах и дефектов пайки. Оптимальные параметры этих ПЭП рассчитывают исходя из тех же условий, что и при расчете призматических ПЭП.

Чувствительность данных ПЭП зависит от тех же факторов, что и призматических. Область максимальной чувствительности, а также максимальная и минимальная глубина прозвучивания (мертвая зона) зависят от угла наклона пьезоэлемента.

Максимальная амплитуда достигается, когда дефект находится примерно в точке пересечения акустических осей. Зона максимальной чувствительности соответствует зоне пересечения основных лепестков диаграмм направленности пьезоэлементов.

Значение угла наклона  $\beta$ , при котором предполагаемая глубина залегания выявляемых дефектов будет лежать в области максимальной чувствительности ПЭП, выбирается по соотношению

$$\beta = \arctg \left( \frac{c_{l_1}}{c_l} \frac{a + m}{(c_{l_1}/c_l)H_n + H} \right), \quad (16.36)$$

где  $H_n$  – высота призмы;  $H$  – расстояние от поверхности изделия до центра пересечения акустических осей;  $m$  – половина расстояния между верхними краями пьезопластины.

#### 16.4.6. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Основные параметры контроля.** Совокупность характеристик, определяющих точность измерения и воспроизводимость результатов, называют *основными параметрами контроля*. Эти параметры определяются соответствующими параметрами аппаратуры (табл. 16.6). Изменение этих параметров приводит к ошибкам в оценке годности изделия, поэтому они задаются НТД.

### 16.6. Основные параметры эхометода

Параметр контроля	Параметр аппаратуры
Длина волны $\lambda$ Угол ввода $\alpha$ Фронтальная разрешающая способность $L_p$ (ширина углового захвата $\theta_p$ )	Тип преобразователя, частота $f$ , угол в призме, размеры пьезоэлемента
Мертвая зона $h_m$	Длительность зондирующего импульса $\tau_3$ и реверберационных шумов в призме $\tau_p$
Разрешающая способность по дальности	Длительность зондирующего импульса $\tau_3$
Чувствительность	Уровень настройки чувствительности дефектоскопа с преобразователем по заданному эталонному отражателю
Направленность	Площадь ПЭП $S_a$ , частота $f$
Погрешность измерения координат, %	Погрешность глубиномера, %
Шаг сканирования	Размеры пьезоэлемента

**Длина УЗ волны**  $\lambda$  в материале определяется задаваемой частотой излучаемых колебаний  $f$ .

**Угол  $\alpha$  ввода УЗ луча** в контролируемый металл – угол между перпендикуляром к поверхности, проходящим через точку ввода луча, и линией луча.

**Разрешающая способность** при УЗ контроле эхометодом определяется минимальным расстоянием между двумя одинаковыми отражателями, на котором они регистрируются раздельно. Различают лучевую  $\Delta r$  и фронтальную  $\Delta l$  разрешающие способности (рис. 16.89). Лучевая определяется минимальным расстоянием  $\Delta r$  между двумя раздельно выявляемыми отражателями, расположенными в направлении хода луча вдоль акустической оси ПЭП. Величина  $\Delta r$  зависит от частоты и длительности  $\tau_3$  излучаемого импульса, максимальной скорости развертки и наличия задержанной развертки. Влияние частоты связано с зависимостью от частоты времени свободных колебаний  $\tau_c$ . Обычно  $\Delta r = (1,5 \dots 2,0)\lambda$ .

Фронтальная разрешающая способность определяется минимальным расстоянием  $\Delta l$  между двумя раздельно выявляемыми отражателями, залегающими на одной глубине. Значение  $\Delta l$  должно превышать большую из двух величин:

$$\Delta l > \begin{cases} D_0; \\ r\lambda / D_0, \end{cases}$$

где  $D_0$  – диаметр пьезоэлемента.

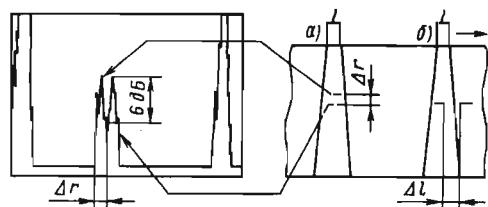
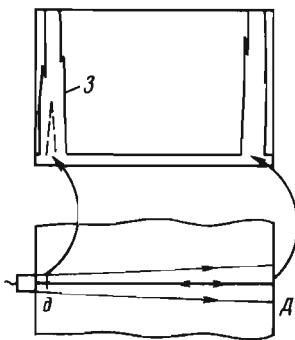


Рис. 16.89. К понятию разрешающей способности:  
а – лучевой; б – фронтальной

**Мертвая зона.** При УЗ контроле эхопульсным методом на вход приемно-усилительного тракта кроме эхосигналов от дефектов поступает импульс от генератора импульсов возбуждения. Если дефект расположен в зоне под поверхностью так, что эхосигнал от него возвращается раньше, чем окончилось излучение генератора, то дефект обнаружен не будет (рис. 16.90). **Мертвой зоной** называется подповерхностная область изделия со стороны установки преобразователя, в которой дефекты заданного размера не могут быть выявлены данной испытательной системой (дефектоскоп и преобразователь).



**Рис. 16.90. К понятию мертвых зон:**  
3 – импульс от генератора (зондирующий);  
Д – донная поверхность; д – несплошность

Размер мертвых зон  $M$  при контроле прямым и наклонным преобразователями зависит от:

- длительности электрического импульса  $\tau_i$ , поступающего на пьезоэлемент с генератора импульсов возбуждения;
- конструкций и характеристик ПЭП. Степень демпфирования пьезоэлемента влияет на длительность его свободных колебаний  $\tau_c$  после окончания воздействия электрического импульса.

Зная значения  $\tau_i$  и  $\tau_c$ , можно оценить мертвую зону для прямого ПЭП:

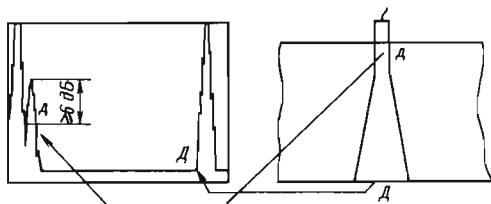
$$M = c_l(\tau_i + \tau_c) / 2, \quad (16.37)$$

где  $c_l$  – скорость продольной волны в контролируемом изделии.

Для наклонных ПЭП мертвая зона уменьшается с увеличением угла призмы. Этому способствует также увеличение частоты УЗ колебаний и размеров призмы. Объясняется это тем, что с возрастанием частоты и габаритных размеров призмы падает уровень реверберационных шумов, обусловливающих в основном мертвую зону наклонного ПЭП.

При экспериментальном определении мертвых зон дефект считается выявленным, если впадина между зондирующими и эхопульсом от дефекта составляет  $\geq 6$  дБ (рис. 16.91).

**Чувствительность.** Это параметр УЗ контроля, определяющий возможность выявления при контроле отражателей заданного размера. Функциональную характеристику параметра «чувствительность», указывающую на его назначение, именуют уровнем чувствительности. Понятие «уровень чувствительности» широко



**Рис. 16.91. Экспериментальное определение мертвых зон**

используют в практической дефектоскопии. Необходимый уровень чувствительности устанавливается органами регулировки дефектоскопа и зависит от акустических свойств контролируемого изделия. Для того чтобы результаты УЗ контроля были достоверны и воспроизводимы, поиск несплошностей, регистрация и оценка их допустимости должны производиться на строго определенных уровнях чувствительности. Далее рассматриваются различные уровни чувствительности.

**Опорным** называют уровень чувствительности, при котором эхосигнал от искусственно-го или естественного отражателя в образце из материала с определенными акустическими свойствами или в контролируемом изделии имеет заданную высоту на экране дефектоскопа. Отражатель, который используют при установке опорного уровня, также называют опорным. Например, при настройке чувствительности часто используют эхосигнал от цилиндрического отверстия диаметром 6 мм в стандартном образце СО-2. Уровень чувствительности, установленный при этом, называют опорным, а отверстие диаметром 6 мм опорным отражателем.

**Контрольным** именуют уровень чувствительности, при котором измеряют характеристики обнаруженных несплошностей и оценивают их допустимость по предельным значениям характеристик (условной протяженности, высоте и др.). В некоторых документах этот уровень чувствительности называют уровнем фиксации, или уровнем регистрации. Во многих случаях на контролльном уровне чувствительности фиксируют непротяженные несплошности.

**Браковочным** считается уровень чувствительности, при котором оценивают допустимость обнаруженной несплошности по амплитуде эхосигнала. В отечественных документах браковочный уровень обычно задают максимальными эквивалентными размерами отражателя, допустимого по техническим условиям на данное изделие. В некоторых зарубежных документах браковочный уровень задают превы-

шением (в децибелах) амплитуды эхопульса от дефекта над контрольным уровнем. Обычно браковочный уровень ниже контрольного не менее чем на 6 дБ.

**Поисковым** называют уровень чувствительности, устанавливаемый на дефектоскопе при поиске дефектов. Обычно он превышает контрольный уровень не менее чем на 6 дБ. Необходимость установления поисковой чувствительности связана с тем, что в динамическом режиме (при перемещении ПЭП) ухудшается акустический контакт ПЭП с изделием, следовательно, через границу раздела проходит меньшее количество звуковой энергии, чем в статическом режиме.

Кроме того, поиск дефектов проводится с определенным шагом. Это значит, что не всегда акустическая ось ПЭП проходит над центром отражателя (дефекта), т.е. не всегда в режиме поиска дефект дает максимальный эхосигнал. Для компенсации этих потерь и увеличивают чувствительность при поиске. Излишнее увеличение чувствительности приводит к возрастанию мертвых зон и снижает производительность контроля в случае большого количества мелких несплошностей в связи с необходимостью оценки эхосигналов от них.

Поисковому уровню соответствует самая высокая чувствительность, т.е. в этом случае будут выявляться даже самые маленькие несплошности – все, что даст эхосигнал, равный или выше линии поискового уровня. Браковочному уровню соответствует самая низкая чувствительность, т.е. выявление только крупных несплошностей.

По способу задания различают следующие виды чувствительности.

**Эквивалентной** называют чувствительность, характеризуемую минимальными размерами искусственного отражателя определенных форм и ориентации, который еще обнаруживается на заданной глубине в изделии при данной настройке дефектоскопа. Например, если чувствительность задана размерами зарубки или цилиндрического отражателя, то ее называют эквивалентной.

Если в качестве искусственного отражателя используют торец отверстия с плоским дном, то получают частный случай эквивалентной чувствительности – предельную чувствительность. Предельную чувствительность характеризуют минимальной площадью отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно к акустической оси ПЭП, которое обнаруживается на заданной глубине в изделии еще при данной настройке

дефектоскопа. Если хотят охарактеризовать возможности дефектоскопа по выявлению несплошностей наименьших размеров на заданной глубине, то говорят о **максимальной предельной чувствительности** – предельной чувствительности при максимальной чувствительности приемника и мощности генератора и заданном соотношении сигнал/помеха.

Уровень чувствительности можно задать и косвенным путем с использованием условной чувствительности. В соответствии с ГОСТ 14782–86 **условной** называют чувствительность, характеризуемую размерами и глубиной залегания выявляемых искусственных отражателей, выполненных в образце из материала с определенными акустическими свойствами.

Условную чувствительность по стандартному образцу СО-1 выражают наибольшей глубиной (в мм) расположения цилиндрического отражателя, фиксируемого индикаторами дефектоскопа, и по стандартному образцу СО-2 – разностью (в дБ) между показанием аттенюатора при данной настройке дефектоскопа и показанием, при котором цилиндрическое отверстие диаметром 6 мм на глубине 44 мм фиксируется индикаторами дефектоскопа.

Понятие «условная чувствительность» было введено в связи с желанием иметь простой и надежный способ задания чувствительности, воспроизводимой с высокой точностью любым дефектоскопистом в любой точке страны. Достаточным условием для этого является наличие стандартного образца СО-1 или СО-2, а в случае использования последнего необходимо также иметь дефектоскоп с аттенюатором, градуированным в децибелах.

Общим для всех трех способов задания чувствительности является то, что речь идет о воспроизведении данной настройки дефектоскопа. Принципиальная разница заключается в том, что эквивалентная и предельная чувствительности учитывают акустические характеристики (в первую очередь затухание) объекта контроля, а условная не связана с ними.

В некоторых зарубежных стандартах (в частности, в США) принято задавать чувствительность в процентах от заданного опорного уровня. Например, в спецификации SA-388 это записано следующим образом: «... регистрируют отдельные индикации, равные или превышающие 10 % от амплитуды донного сигнала ...». Такой способ задания чувствительности напрямую не вписывается ни в одно из отечественных понятий.

С целью характеристики технических возможностей дефектоскопа в части усиления электрических сигналов введено понятие «абсолютная чувствительность».

**Абсолютная чувствительность** определяется отношением минимального акустического сигнала, который регистрируется дефектоскопом, к амплитуде акустического зондирующего импульса. Понятие «абсолютная чувствительность», применяемое в отечественной литературе, идентично ранее рассмотренному понятию «резерв усиления». Абсолютная чувствительность выражается в децибелах. Используя абсолютную чувствительность, можно определить максимальную предельную чувствительность.

И, наконец, когда хотят поставить вопрос о фактических размерах несплошностей, выявляемых при контроле, то говорят о реальной чувствительности. **Реальная чувствительность** характеризуется минимальными размерами реальных несплошностей конкретного типа, выявляемых в конкретном объекте на заданной глубине данными средствами контроля при заданных параметрах контроля и схеме прозвучивания. Она может быть определена в результате статистической обработки данных контроля и металлографического исследования большой серии объектов этого вида. Реальная чувствительность может служить основанием для оценки эффективности УЗ контроля.

**Направленность поля ПЭП** достаточно подробно описана в разд. 16.4.1. Здесь дополнительно рассмотрим способ экспериментального определения ширины диаграммы направленности на уровне  $n$  дБ наклонного ПЭП в плоскости падения (рис. 16.92). Для этого наклонный ПЭП устанавливают на поверхность А (для углов ввода  $\leq 65^\circ$ ) или Б (для углов ввода  $> 65^\circ$ ) стандартного образца СО-2. Получают максимальный эхосигнал от отверстия диаметром 6 мм и аттенюатором доводят высоту эхопульса до заданного уровня. Считывают показание аттенюатора  $A_0$  (в дБ), а напротив точки выхода ПЭП на образце – значение угла ввода  $\alpha$ . Затем повышают силу на  $n$  дБ и ПЭП смешают в направлении отверстия до тех пор, пока высота эхопульса не уменьшится до заданного уровня. В этом положении напротив точки выхода считывают величину угла  $\alpha_n$ .

После этого возвращаются к максимуму и смешают ПЭП в направлении от отверстия до

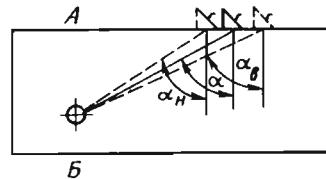


Рис. 16.92. Экспериментальное определение ширины диаграммы направленности наклонного ПЭП в плоскости падения

тех пор, пока высота эхопульса не уменьшится до заданного уровня. Считывают значение угла  $\alpha_n$ . Ширина диаграммы направленности на уровне  $n$  дБ вверх от акустической оси  $\Theta_B = \alpha_n - \alpha$ , а вниз от акустической оси  $\Theta_H = \alpha_H - \alpha$ .

**Точность измерения координат** дефектов при использовании современных средств контроля зависит от:

- точности измерения дефектоскопом временных интервалов [она выражается в единицах времени или расстояния (если используется цифровой глубиномер) либо определяется линейностью горизонтальной развертки (если координата отсчитывается по положению эхопульса на горизонтальной линии развертки);]
- соответствия фактической скорости звука установленной на дефектоскопе;
- соответствия фактического угла ввода принятому значению при использовании наклонных ПЭП;
- правильности установки нуля отсчета расстояний (задержки развертки);
- точности определения наклонным ПЭП положения, в котором достигается максимальный эхопульс от дефекта.

**Шаг сканирования.** Обычно применяют один из двух вариантов сканирования: попечечно-продольное или продольно-поперечное. Способ сканирования, при котором ПЭП перемещают в поперечном направлении относительно контролируемого сечения, систематически сдвигая на определенное расстояние в продольном направлении, называют поперечно-продольными (рис. 16.93, а).

При продольно-поперечном способе сканирования ПЭП перемещают в продольном направлении относительно контролируемого сечения, систематически сдвигая на определенное расстояние в поперечном направлении (рис. 16.93, б).

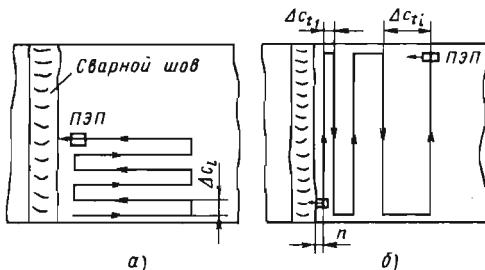


Рис. 16.93. Схемы сканирования шва посредством поперечно-продольного (а) и продольно-поперечного (б) перемещения ПЭП

Расстояние между соседними траекториями точки ввода упругих колебаний при любом способе сканирования называют шагом сканирования.

При поперечно-продольном перемещении ПЭП шаг сканирования для изделий толщиной  $\geq 50$  мм обычно выбирают равным половине размера пьезоэлемента в направлении, перпендикулярном к перемещению. Для изделий толщиной  $< 50$  мм он определяется экспериментально и соответствует половине условной протяженности дискового отражателя площадью, равной минимально фиксируемому дефекту, определенной на поисковой чувствительности.

**Образцы для УЗ контроля.** Образцом называют средство УЗ контроля в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения значений физических величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых для проверки или настройки параметров дефектоскопа и преобразователей.

Различают стандартные образцы (СО) и стандартные образцы предприятия (СОП).

К стандартным относят образцы СО-1, СО-2, СО-3, описанные в ГОСТ 14782-86, а также образцы К1, К2, VW, СВУ, широко применяемые в европейской международной практике. Стандартный образец СО-1 (рис. 16.94) изготавливается из органического стекла марки ТОСП. Коэффициент затухания продольной УЗ волны в образце при частоте  $2,5 \pm 0,2$  МГц и температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  составляет  $0,30 \pm 0,04 \text{ см}^{-1}$ . Скорость продольных волн в образце  $c_l = 2670 \pm 133$  м/с. Стандартный образец СО-1 предназначен для:

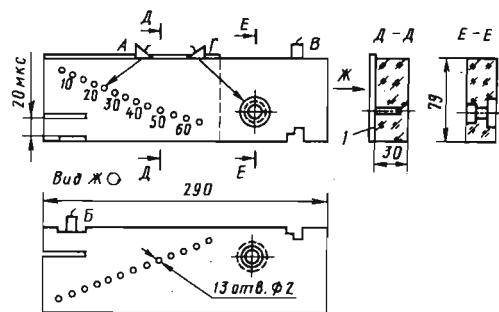


Рис. 16.94. Стандартный образец СО-1 (вид Ж повернут. Стенка 1 не показана)

- определения условной чувствительности (в мм) глубины залегания цилиндрического отверстия (ПЭП в положении А);

- оценки точности работы глубиномера (прямой ПЭП в положении Б) для дефектоскопов, у которых глубиномер калиброван в единицах времени. Время прохождения УЗ расстояния от поверхности, на которую установлен ПЭП, до пропила 20 мкс;

- оценки лучевой разрешающей способности прямого ПЭП (прямой ПЭП в положении В). При этом если все три отражателя разрешаются, то на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса (рис. 16.95), расстояния между которыми соответствуют по стали: 1 – 2 – 5,5 мм; 2 – 3 – 11 мм;

- оценки лучевой разрешающей способности наклонного ПЭП (наклонный ПЭП в положении Г). При этом на экране дефектоскопа появляются три импульса от поверхностей цилиндров, расстояния между которыми (импульсами) соответствуют по стали: 1 – 2 – 5,5 мм; 2 – 3 – 11 мм.

Стандартный образец СО-2 (рис. 16.96) изготавливают из стали 20. Скорость продольной волны в образце при температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  равна  $c_l = 5900 \pm 59$  м/с. Стандартный образец СО-2

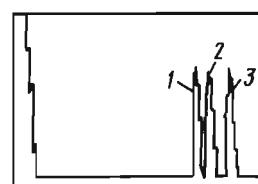


Рис. 16.95. Картина на экране дефектоскопа при оценке разрешающей способности по образцу СО-1

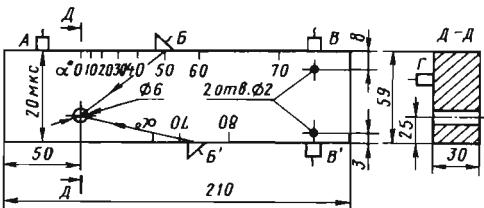


Рис. 16.96. Стандартный образец СО-2

используют для настройки и проверки параметров при УЗ контроле объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей и определения условной чувствительности при контроле любых материалов. Его применяют для:

- определения погрешности глубиномера (прямой ПЭП в положении А). Время прохождения УЗ расстояния от поверхности до дна 20 мкс;
- измерения угла ввода луча (наклонный ПЭП в положении Б или Б'). Перемещая наклонный ПЭП около этих положений, получают максимальный эхосигнал. Величину угла ввода считывают по риске напротив точки выхода;
- проверки мертвых зон дефектоскопа с преобразователем (ПЭП в положении В или В');
- определения условной чувствительности в децибелах (ПЭП в положении Б или Б');
- определения предельной чувствительности (с использованием опорного отражателя диаметром 6 мм, ПЭП в положении Б или Б');
- измерения ширины основного лепестка диаграммы направленности (перемещение наклонного преобразователя около положения Б или Б');
- настройки глубиномера дефектоскопа с прямым ПЭП (ПЭП в положении А или Г);
- настройки чувствительности дефектоскопа с использованием опорного сигнала от отверстия диаметром 6 мм (наклонный ПЭП в положении Б или Б').

При контроле соединений из металлов, отличающихся по акустическим характеристикам от малоуглеродистой и низкоуглеродистой сталей, для определения указанных параметров (исключая погрешность глубиномера) следует применять стандартный образец СО-2А, изготовленный из соответствующего материала. Конструкции образцов СО-2А и СО-2 одинаковы, однако угловые деления и время пробега продольной волной пути 59 мм должны быть определены для данного материала.

Стандартный образец СО-3 (рис. 16.97) изготавливают из стали 20 или Ст3. Скорость продольной волны в образце  $c_l = 5900 \pm 59$  м/с. Этот образец предназначен для:

- определения точки выхода УЗ луча (для этого наклонный ПЭП устанавливают над центральной риской, небольшими перемещениями находят положение, соответствующее максимальному эхосигналу; точка выхода расположена точно над центральной риской образца);
- определения условной чувствительности для наклонного ПЭП;
- определения предельной чувствительности для наклонного ПЭП;
- настройки глубиномера для наклонного ПЭП;
- настройки чувствительности для наклонного ПЭП.

Все указанные операции выполняют в положении наклонного ПЭП, когда его точка выхода совпадает с центром 0 образца. Три последние операции могут осуществляться только для объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей.

Стандартный образец К1 (рис. 16.98) изготавливают из углеродистой стали. В отверстие диаметром 50 мм запрессовывают цилиндр из органического стекла. Скорость продольных волн в образце К1  $c_l = 5920 \pm 30$  м/с; сдвиговых –  $c_s = 3255 \pm 15$  м/с. Образец К1 предназначен для:

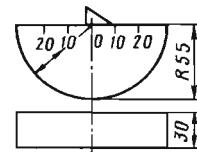


Рис. 16.97. Стандартный образец СО-3

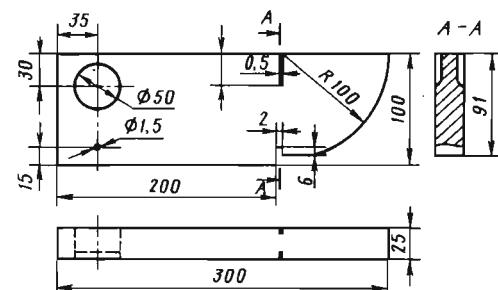


Рис. 16.98. Стандартный образец К1

- настройки глубиномера дефектоскопа и проверки линейности развертки. При этом в зависимости от требуемого диапазона настройки, прямой ПЭП устанавливают в одно из положений А<sub>1</sub> – А<sub>4</sub> (рис. 16.99). Время прохождения продольной волны путем в оргстекле (положение А<sub>4</sub>) соответствует времени прохождения расстояния 50 мм по стали;

- настройки глубиномера дефектоскопа для сводговых волн. Для этого наклонный ПЭП устанавливают в положение В;

- настройки скорости развертки для сводговых волн. При этом прямой ПЭП помещают в положение Б. Время прохождения продольными волнами путем в 91 мм соответствует времени прохождения сводговыми волнами путем в 50 мм. Таким образом, данные импульсы следует устанавливать на отметках 50, 100, 150 мм и т.д.;

- определения точки выхода наклонного ПЭП. В этом случае наклонный ПЭП помещают в положение В, небольшими перемещениями его получают максимальный эхосигнал от цилиндрической поверхности радиусом 100 мм. В данном положении точка выхода расположена над пропилом в образце К1;

- измерения угла ввода наклонного ПЭП. Для этого ПЭП устанавливают в положения А, Б и В (рис. 16.100) для углов соответственно 35...60; 60...75 и 75...80°. Получают максимальный эхоИмпульс от цилиндрической поверхности радиусом 50 мм. Угол ввода считывают с делений, расположенных под точкой выхода луча;

- проверки мертвых зон прямых или раздельно-совмещенным ПЭП (см. рис. 16.100, ПЭП в положениях Г, Д);

- проверки разрешающей способности прямого ПЭП (ПЭП в положении Е);

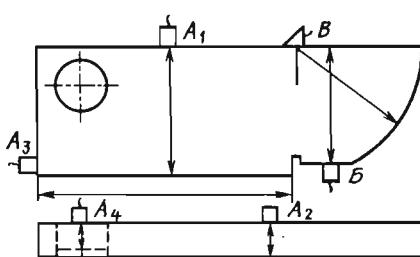


Рис. 16.99. Использование образца К1 для настройки глубиномера

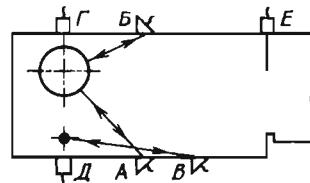


Рис. 16.100. Определение угла ввода наклонного ПЭП (А – В) и разрешающей способности прямого ПЭП (Е), оценка мертвых зон (Г, Д)

- задания условной чувствительности дефектоскопа с прямым ПЭП (рис. 16.101). При этом в качестве опорного отражателя используют поверхности образца, расположенные на разных расстояниях (ПЭП в положениях А, В) или в материале с повышенным затуханием (ПЭП в положении Б – на поверхности цилиндра из оргстекла);

- задания условной чувствительности дефектоскопа с наклонным ПЭП. В качестве опорного отражателя используют двухгранный угол, образованный плоскостью образца К1 и цилиндрической поверхностью отверстия диаметром 1,5 мм (см. рис. 16.101, ПЭП в положении Г);

- настройки чувствительности дефектоскопа при работе с наклонным ПЭП. В качестве опорных используют эхоИмпульсы от внутренней поверхности цилиндра радиусом 100 мм (см. рис. 16.99, положение В), наружных поверхностей диаметром 50 мм (см. рис. 16.100, положения А, Б) и 1,5 мм (см. рис. 16.100, положение В). Эти же поверхности можно использовать для задания условной или определения предельной чувствительности.

Стандартный образец К2 (рис. 16.102) предназначен для:

- настройки глубиномера дефектоскопа при работе с прямыми (положение А) и наклонными (положение Б) преобразователями (рис. 16.103);

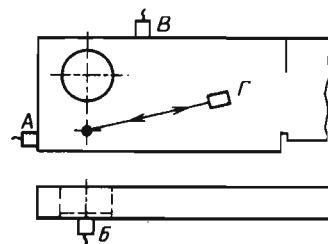


Рис. 16.101. Задание условной чувствительности дефектоскопа с использованием образца К1

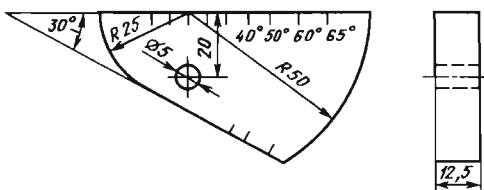


Рис. 16.102. Стандартный образец К2

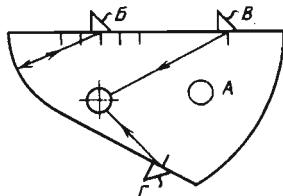


Рис. 16.103. Применение стандартного образца К2

– определения точки выхода луча для наклонных ПЭП. Преобразователь устанавливают в положение Б (см. рис. 16.103), получают максимальный эхопульс от цилиндрической поверхности радиусом 25 мм. В этом положении точка выхода расположена под центром дуги радиусом 25 мм;

– измерения угла ввода наклонных ПЭП (положения В и Г для углов соответственно 35...65 и 65...70°). Получают максимальный эхопульс от отверстия диаметром 5 мм. В этом положении угол ввода считывают по метке, расположенной под точкой выхода ПЭП;

– настройки чувствительности дефектоскопа при работе с наклонными ПЭП. В качестве опорных используют эхосигналы от вогнутых цилиндрических поверхностей радиусом 25 (ПЭП в положении Б) или 50 мм (ПЭП в положении Б с разворотом на 180°) и от отверстия диаметром 5 мм (ПЭП в положении В или Г в зависимости от угла ввода). Эти же отражатели можно использовать для задания условной или определения предельной чувствительности.

Материал и акустические свойства образца К2 такие же, как и у образца К1.

Стандартный образец СВУ (рис. 16.104), изготовленный из материала с такими же акустическими свойствами, как и у образца К1, предназначен для:

– настройки глубиномера дефектоскопа для прямого ПЭП и проверки линейности развертки. В зависимости от требуемого диапазона настройки прямой ПЭП устанавливают в одно из положений А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> (рис. 16.105);

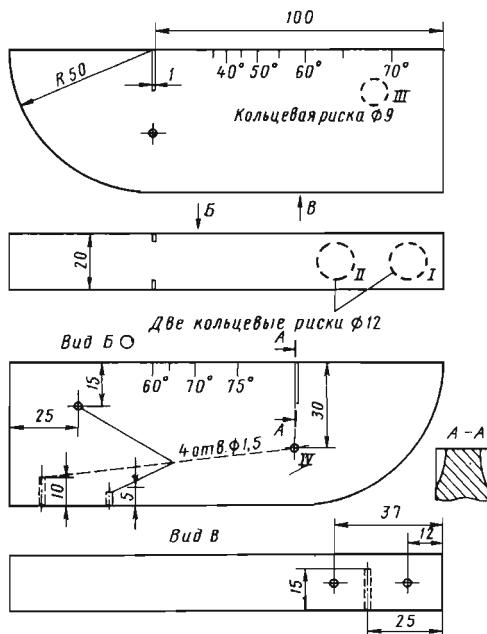


Рис. 16.104. Стандартный образец СВУ

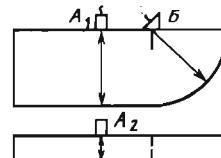


Рис. 16.105. Настройка глубиномера дефектоскопа стандартным образцом СВУ

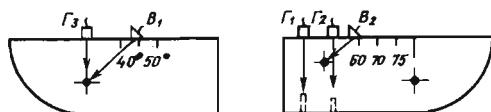
– настройки глубиномера дефектоскопа при работе с наклонными ПЭП (положение Б);

– определения точки выхода наклонного ПЭП (положение Б);

– измерения угла ввода наклонного ПЭП (положения В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> на рис. 16.106);

– проверки разрешающей способности прямого ПЭП (положения Г<sub>1</sub>, Г<sub>2</sub> на рис. 16.106);

– контроля мертвых зон прямых и раздельно-совмещенных ПЭП (положение Д на рис. 16.107);

Рис. 16.106. Определение угла ввода наклонного ПЭП (В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>) и разрешающей способности прямого ПЭП (Г<sub>1</sub>, Г<sub>2</sub>)

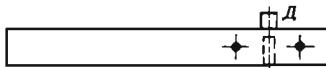


Рис. 16.107. Проверка мертвых зон прямых и раздельно-совмещенных ПЭП

- настройки чувствительности дефектоскопа с прямым или раздельно-совмещенными ПЭП использованием эхосигнала от плоскости (положения А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> на рис. 16.105), плоскодонных отражателей (положения Г<sub>1</sub>, Г<sub>2</sub> на рис. 16.106 и Д на рис. 16.107) или цилиндрического отражателя (положение Г<sub>3</sub> на рис. 16.106). Эти же отражатели годятся для задания условной или определения предельной чувствительности;

- настройки чувствительности для наклонных ПЭП с помощью опорного сигнала от внутренней поверхности дуги радиусом 50 мм (положение Б на рис. 16.105) или цилиндрического отражателя (положение В<sub>1</sub> на рис. 16.106). Эти же отражатели можно использовать для задания условной или определения предельной чувствительности.

Стандартный образец VW (рис. 16.108), изготовленный из материала с такими же акустическими свойствами, как у образца K1, предназначен для настройки глубиномера дефектоскопа при измерении малых толщин.

Стандартные образцы K1, K2, VW, CBU применяют для настройки и проверки параметров при УЗ контроле объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей, за исключением параметра условной чувствительности, который можно использовать для любых материалов.

Стандартные образцы предприятия (СОП) получили широкое распространение для настройки глубиномера и (или) чувствительности дефектоскопа. СОП воспроизводят акустические свойства материала, конфигурацию, а также форму и шероховатость поверхности контролируемых изделий.

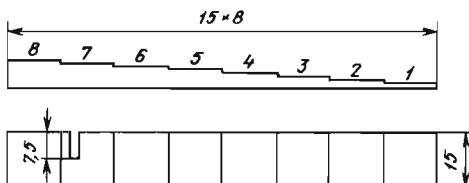


Рис. 16.108. Образец VW. Толщину каждой ступени указывает цифра над ней

В СОП выполняют искусственные отражатели, расположенные на различных глубинах и имитирующие естественные дефекты изделий. Конкретные типы СОП и области их применения определяются стандартами и другими методическими документами, регламентирующими УЗ контроль.

Наибольшее распространение получили СОП с искусственными несплошностями в виде плоскодонных дисковых отражателей (ПДО), ориентированных перпендикулярно к УЗ лучу, и цилиндрических отверстий, образующая которых направлена перпендикулярно к УЗ лучу.

**Измеряемые характеристики дефектов.** Основным параметром, по которому в эхопульсном методе судят о величине обнаруженной несплошности, является амплитуда отраженного от нее сигнала. Эхопульс на экране дефектоскопа, возникший при прохождении этого сигнала, сравнивают с эхопульсом от искусственного отражателя заданной геометрической формы, условно помещенного в ту же точку изделия, где находится дефект.

Как было отмечено ранее, реальные дефекты отличаются от идеальных геометрических моделей. Вследствие этого при одинаковой амплитуде эхопульсов от несплошностей и искусственного отражателя их геометрические размеры, как правило, отличаются. Поэтому в УЗ дефектоскопии для характеристики геометрических размеров выявленной несплошности используют понятие «эквивалентный размер». Если в качестве отражателя, используемого для сравнения, принимают не ПДО, а какой-нибудь другой, то определение эквивалентного размера идентично, только вместо круглого плоскодонного используется предлагаемый тип отражателя.

Акустическое поле, формируемое преобразователем в изделии, представляет собой пучок, ширина которого изменяется с глубиной. При перемещении ПЭП слева направо (рис. 16.109) эхопульс возникает, когда дефект Д озвучивается правой частью пучка. При пересечении акустической осью ПЭП центра дефекта эхопульс максимален. Таким образом, при перемещении ПЭП над компактным (точечным) дефектом эхопульс от него наблюдается не в точке, а на некотором участке протяженностью  $2L_0$ . Поскольку ширина пучка (ширина диаграммы направленности) зависит от того, на каком уровне она определяется, то и  $2L_0$  изменяется в некоторых пределах при изменении усиления дефектоскопа.

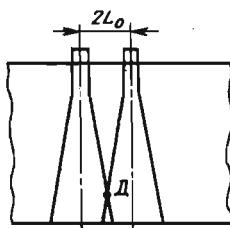


Рис. 16.109. К понятию условных границ компактного дефекта

Если дефект имеет протяженность, то его границы, определенные эхомпульсным методом, также могут отличаться от истинных (рис. 16.110). В связи с этим в УЗ дефектоскопии используют понятие «условные границы несплошности». Условной границей несплошности называют геометрическое место положений центра прямого ПЭП или проекций на поверхности контроля отражающих точек несплошности при контроле наклонным ПЭП в положениях, при которых амплитуда эхосигнала от несплошности достигает заданного уровня. Известны два способа определения условных границ: относительный и абсолютный.

Способ определения условных границ по положению преобразователя, при которых амплитуда эхосигнала от дефекта уменьшается на  $n$  дБ от своего максимального значения, называют *относительным*. В отечественной практике чаще всего  $n = 6$  дБ, в зарубежной значение  $n$  при контроле сварных соединений обычно зависит от толщины контролируемого объекта и возрастает с увеличением толщины от 0 до 12 дБ.

Способ определения условных границ по положениям преобразователя, при которых амплитуда эхомпульса от дефекта уменьшается до заданного (например, до контрольного) уровня чувствительности (с учетом глубины залегания несплошности), называют *абсолютной*.

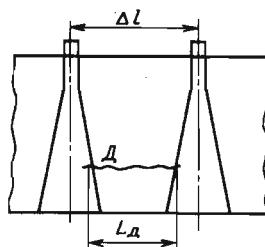


Рис. 16.110. К понятию условных границ протяженного дефекта

В отечественной практике получил также применение способ, представляющий собой комбинацию двух вышеназванных: определение условных границ по положениям преобразователя, при которых амплитуда эхомпульса от дефекта уменьшается на  $n$  дБ от своего максимального значения или до контрольного уровня чувствительности (с учетом глубины залегания несплошности), при этом из двух названных значений выбирают соответствующее более высокому уровню чувствительности.

Условной протяженностью  $\Delta l$  дефекта в каком-либо направлении называют максимальное расстояние между его условными границами в данном направлении.

Рассмотрим направления измерения условной протяженности.

При контроле сварных швов наибольшая протяженность наблюдается чаще всего в направлении вдоль шва (рис. 16.111), хотя в практике встречаются случаи расположения протяженных дефектов под некоторым углом к продольной оси сварного шва или поперек шва.

Условной шириной  $\Delta X$  дефекта называют расстояние между его условными границами при перемещении наклонного ПЭП в плоскости падения луча (рис. 16.112). Разность показаний глубиномера дефектоскопа, снятых в тех же положениях наклонного ПЭП, называют *условной высотой*  $\Delta H$  дефекта.

При контроле зеркально-теневым методом условные границы дефекта определяют по положениям точки выхода ПЭП, в которых амплитуда донного сигнала достигает уровня, заданного нормативными документами. Обычно это задают поисковый или контрольный уровень чувствительности.

Условным расстоянием  $\Delta L$  между дефектами называют расстояние между крайними положениями ПЭП, по которым определялась условная протяженность двух рядом расположенных дефектов (см. рис. 16.111).

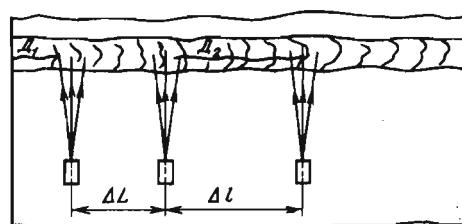


Рис. 16.111. Определение условной протяженности  $\Delta l$  дефекта и условного расстояния  $\Delta L$  между дефектами в сварном шве при контроле наклонным преобразователем

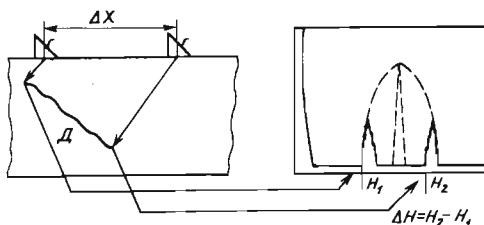


Рис. 16.112. Измерение условной ширины  $\Delta X$  и условной высоты  $\Delta H$  дефекта

Для классификации несплошностей на протяженные и непротяженные используют величину  $L_{\text{деф}}$  (рис. 16.113), определяемую максимальным расстоянием от условной границы дефекта до точки, где наблюдается максимальный эхоимпульс от данного дефекта. Величину  $L_{\text{деф}}$  сравнивают с действующей полушириной пучка  $L_0$ . Величина  $L_0$  может быть определена экспериментально и рассчитана.

При использовании экспериментального метода (см. рис. 16.113) выбирают ступень СОП, соответствующую глубине залегания дефекта. Находят искусственный отражатель, эквивалентный по амплитуде данному дефекту, и определяют на поверхности сканирования СОП расстояние между условными границами на том же уровне чувствительности, что и для реального дефекта. Этим расстоянием определяется величина  $2L_0$ .

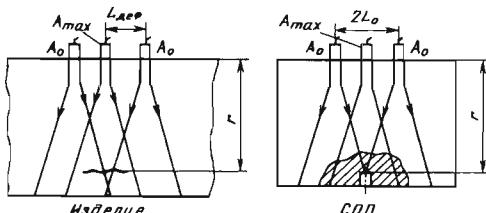


Рис. 16.113. Экспериментальное определение действующей полуширины пучка

При расчетном способе действующую полуширину пучка приравнивают к полуширине диаграммы направленности и для прямых ПЭП с круглым пьезоэлементом определяют по формуле

$$L_0 = r \operatorname{tg} \theta_0,$$

где угол  $\theta_0$  определяется в зависимости от разности  $|A_{\max} - A_0|$  из табл. 16.7.

Значения  $A_{\max}$  и  $A_0$  считывают с аттенюатора;  $|A_{\max} - A_0|$  – модуль (положительное значение) разности, дБ;  $r$  – расстояние от поверхности ввода до дефекта, мм;  $a$  – радиус пьезоэлемента ПЭП, мм;  $\lambda$  – длина УЗ волны в изделии, мм;  $\theta_0$  – полуширина диаграммы направленности на уровне  $|A_{\max} - A_0|$  дБ, град.

Найденное одним из этих способов значение  $L_0$  сравнивают с величиной  $L_{\text{деф}}$ . Если  $L_{\text{деф}} \leq L_0$ , дефект считают непротяженным, если  $L_{\text{деф}} > L_0$  – протяженным.

Аналогичным способом можно классифицировать дефекты по параметру  $\Delta H$  (условной высоте).

Пример. Дефектоскоп USK 7S с преобразователем типа B2SN ( $a = 12$  мм,  $f = 2,0$  МГц) на глубине  $r = 150$  мм обнаружен дефект  $A_{\max} = 26$  дБ. Его  $L_{\text{деф}}$ , определенная при уровне чувствительности  $A_0 = 34$  дБ, составляет 15 мм. Определить, является ли данный дефект протяженным.

*Решение.* Из табл. 16.7 для  $|A_{\max} - A_0| = 8$  дБ получаем

$$\frac{a}{\lambda} \sin \theta_0 = \frac{af}{c} \sin \theta_0 = 0,30.$$

Подставив значения, найдем  $\sin \theta_0 = 0,074$ ,  $\theta_0 = 4,2^\circ$ ,  $\operatorname{tg} \theta_0 = 0,074$ . Итак,  $L_0 = 11,1$  мм. Поскольку  $L_{\text{деф}} > L_0$ , дефект классифицируется как протяженный.

## 16.7. Определение полуширины диаграммы направленности $\theta_0$

$ A_{\max} - A_0 $	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Угол $\theta_0$	0,15	0,21	0,26	0,30	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,43	0,46

Условные обозначения:  $A_{\max}$  – амплитуда эхоимпульса от дефекта, дБ;  $A_0$  – уровень, на котором определяются условные границы, дБ.

### Основные операции и схемы контроля.

Все операции по УЗ контролю можно разбить на пять этапов, а именно:

- 1) изучение объекта контроля, подготовка его к работе;
- 2) определение или выбор из имеющегося банка технологического процесса (карты контроля) с указанием основных параметров контроля и схемы прозвучивания;
- 3) проверка исправности и основных параметров аппаратуры и подготовка ее к работе;
- 4) контроль, измерение координат и величины дефектов, оценка качества шва;
- 5) документальное оформление результатов контроля.

Изучение объекта контроля слагается из ознакомления с конструкцией соединения и технологией сварки, а также с документами, отражающими отступление от требования чертежей; внешнего осмотра шва с измерением его ширины, или катета, и ОШЗ; выбора схемы прозвучивания.

Если контролируемый шов имеет какие-либо наружные дефекты, конструктивные отклонения или особенности, не оговоренные в чертежах, то необходимо оценить, насколько они мешают контролю и могут исказить его результаты. Дефекты должны быть устранены до контроля.

Если отклонения не позволяют провести достоверный контроль, то его следует отменить до устранения мешающих причин или выполнять лишь факультативно, что фиксируют в соответствующем документе.

В содержащихся в отраслевых руководящих документах (РД) требованиях под термином «объем контроля» понимают протяженность сварных соединений или площадь наплавок.

Другой критерий – объем сканирования каждого отдельного сварного соединения. Его определяют как суммарную протяженность контролируемой части соединения вдоль его периметра, отнесенную к полной протяженности сварного соединения.

Поверхности сварных соединений в зоне перемещения ПЭП с обеих сторон сварного шва должны быть очищены от пыли, грязи, окалины. С них следует удалить забоины и неровности.

Ширина подготовленной под контроль зоны с каждой стороны шва должна быть  $\geq H \operatorname{tg} \alpha + A + B$  – при контроле совмещенными ПЭП прямым лучом и  $\geq 2H \operatorname{tg} \alpha + A + B$  – при контроле однократно отраженным лучом и

по схеме «танDEM», где  $H$  – толщина сварного соединения;  $A$  – длина ПЭП,  $B$  – ширина оцениваемой ОШЗ.

Переход на новую технологию сварки (например, двустороннюю вместо односторонней или со щелевой разделкой вместо широкой) требует обязательной корректировки производственной инструкции на основе экспериментальных исследований, выполненных на нескольких образцах-свидетелях с последующей разделкой их.

Цель этих исследований – разобраться в особенностях прозвучивания швов, оценить уровень ложных сигналов от границы наплавленного металла, характер структурной реверберации, коэффициент затухания звука и т.п. Технологический процесс, или карта контроля, составляется инженерно-техническим персоналом на основе априорных статистических данных по дефектности или выполненных исследований, требований ГОСТ 14782-86 и отраслевой нормативной документации. Он должен содержать всю необходимую информацию для оператора.

Основным рабочим документом, на основании которого непосредственно проводится неразрушающий контроль, является технологическая карта. Для составления карт по конкретному виду контроля необходимо знание как параметров контролируемого изделия, так и технологии, оборудования и НТД и технологической документации, на основании которой должен проводиться контроль. При этом ввиду сложности и громоздкости расчетов и необходимости учета большого числа факторов и требований НТД возможны как объективные, так и субъективные ошибки.

В процессе сканирования наклонный ПЭП необходимо непрерывно поворачивать вокруг его вертикальной оси на  $\pm 15^\circ$ , чтобы обнаружить различно ориентированные дефекты (рис. 16.114).

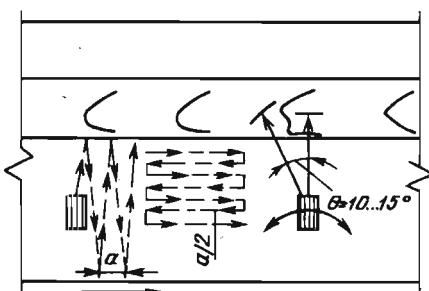


Рис. 16.114. Сканирование при контроле сварных соединений

В сварных соединениях УЗ контролю подлежит металл шва, зоны сплавления и термического влияния.

При появлении эхосигналов на рабочем участке развертки чувствительность снижается до уровня предельной чувствительности, установленной при эталонировании, и если обнаруженный эхосигнал превышает этот уровень, то измеряются характеристики неплоскости и, когда необходимо, тип отражателя – плоскостной он или объемный. Все эти характеристики определяются при контрольной чувствительности дефектоскопа. В швах с толщиной стенки  $<15$  мм условная высота обычно не определяется.

В большинстве действующих в РФ отраслевых РД для оценки качества используются критерии, изложенные в ГОСТ 14782–86: амплитуда эхосигнала или эквивалентный размер (площадь или диаметр); условная протяженность; условная высота; удельная плотность дефектов на единицу длины контролируемого участка.

Следует заметить, что за рубежом идут активные дискуссии о том, целесообразно ли измерять эквивалентную площадь из-за малой информативности этого критерия. Однако в качестве экспериментальной базы, послужившей основой для таких сомнений, явились измерения, как правило, дефектов, размеры которых соизмеримы или даже намного превышали диаметр пьезопластины. По нашему мнению, эти результаты нельзя переносить на неболь-

шие дефекты, к тому же недопустимые по существующим в РФ нормам оценки качества. Поэтому отменять критерий «эквивалентный размер дефекта» в настоящее время, на наш взгляд, нецелесообразно.

В ОШЗ возможны расслоения металла, затрудняющие определение координат дефекта. Зону шва, в которой обнаружен дефект на склонным ПЭП, следует дополнительно проконтролировать прямым ПЭП – для уточнения характера и размеров дефекта и определения его глубины.

Степень допустимости обнаруженного при УЗ контроле дефекта должна быть адекватна его потенциальной опасности для эксплуатируемого оборудования. Основные показатели опасности дефекта характеризуются его размерами и типом.

Оценка степени допустимости обнаруженной несплошности и перевод ее в разряд дефекта проводятся по степени соответствия измеренных характеристик и их совокупности предельно допустимым численным значениям этих же характеристик, заложенным в НТД.

Для контроля обычно применяют прозвучивание эхометодом (рис. 16.115): только прямым лучом (а), прямым и однократно отраженным лучом (б), многократно отраженным лучом (в), по слоям – по совмещенной схеме включения в дефектоскоп (г), а также эхозеркальным, зеркально-теневым и дельта-методами.

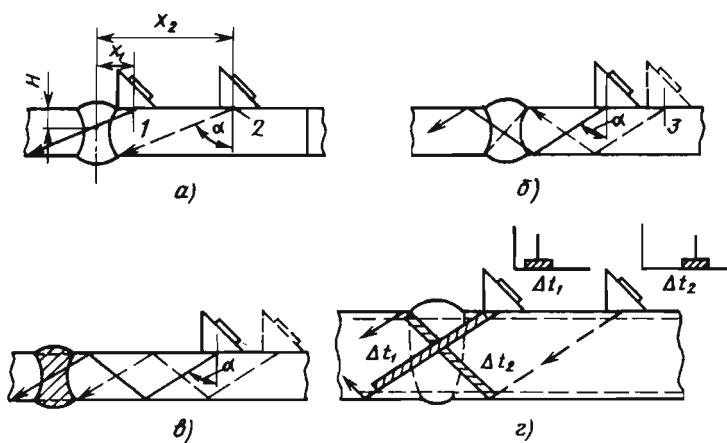


Рис. 16.115. Способы прозвучивания сварных соединений

**Способ прозвучивания прямым лучом** (см. рис. 16.115, а) является основным способом контроля. ПЭП при прозвучивании прямым лучом перемещается в ОШЗ от валика шва на расстоянии  $x_2 = H \operatorname{tg} \alpha + b / 2$ . Способ наиболее помехоустойчив, т.е. при его применении наблюдается минимум ложных эхосигналов от каких-либо элементов конструкции в зоне соединения (приварных косынок или штуцеров, различных вырезов валика выпуклости и т.п.). Недостатком его является наличие мертвых зон, вызванной тем, что преобразователь упирается в валик выпуклости шва. Для плоских соединений размер мертвых зон  $H_m$  может быть найден из выражения  $H_m = (b / 2 + n_0) \operatorname{ctg} \alpha$ .

Следовательно, условием пересечения всего объема шва осью УЗ пучка, т.е. условием полного прозвучивания, является  $b / 2 \leq H \operatorname{tg} \alpha - n_0$ .

При контроле необходимо выбирать такие параметры ПЭП (угол ввода  $\alpha$  и стрелу  $n_0$ ), чтобы  $H_m$  была минимальна. Для особо ответственных изделий и в случае выявления неблагоприятной статистики распределения дефектов под валиком верхнюю часть шва целесообразно прозвучивать преобразователем с углом  $\beta = 53 \dots 55^\circ$  или поверхностными волнами (см. далее).

Способ применяется для контроля швов всех толщин, является единственным пригодным для прозвучивания также швов толщиной 3,5...10 мм, выполненных односторонней сваркой с проплавлением, дефекты в которых находятся в корне. В последнем случае ПЭП обычно перемещается только вдоль шва.

**Контроль прямым и однократно отраженным лучом** осуществляется при перемещении ПЭП между точками 1 – 3 (см. рис. 16.115, б). Этот способ годится для контроля с одной стороны изделия, а также прозвучивания мертвых зон. ПЭП при прозвучивании прямым и однократно отраженным лучом перемещают вдоль линии, отстоящей от оси шва на расстоянии  $x_2 = 2H \operatorname{tg} \alpha + b / 2$ , где  $b$  – ширина валика.

Недостаток этого способа – зависимость предельной чувствительности к дефектам, выявляемым отраженным лучом, от состояния поверхности. Поэтому, в частности, если сосуд заполнен жидкостью, то перед контролем она должна быть удалена.

**Контроль многократно отраженным лучом** (см. рис. 16.115, в) сопровождается

большим числом ложных сигналов от валика выпуклости шва и является наименее помехоустойчивым. Применение его ограничивается случаями, когда не имеется доступа непосредственно к шву (например, стыковое соединение с обеих сторон закрыто приварными накладками).

**Контроль по слоям** наиболее достоверен. Он заключается в том, что прозвучивание проводят любым из перечисленных способов, но эхосигналы фиксируют только на определенном рабочем участке развертки  $\Delta t_i$ , выделяемом путем стробирования (рис. 16.115, г). Способ помехоустойчив, позволяет уменьшить ошибки в оценке дефектов благодаря тому, что предельная чувствительность при контроле устанавливается для каждого слоя отдельно. Но он, естественно, обладает наименьшей производительностью, поэтому наиболее эффективно его применение для контроля швов толщиной  $> 50 \dots 60$  мм.

**Особенности УЗ контроля сварных соединений различных типоразмеров.** Стыковые сварные соединения толщиной 3,5...60 мм контролируют наклонными преобразователями прямым или прямым и однократно отраженным лучом с одной поверхности изделия. Каждый шов контролируют с двух боковых сторон. Исходя из особенностей контроля, всестыковые сварные соединения листовых и трубных конструкций можно подразделить на четыре группы.

1. **Сварные соединения, выполненные без подкладок.** Особенностями сварных швов толщиной 3,5...15 мм листовых и трубных конструкций, полученных односторонней дуговой сваркой или сваркой в защитных газах, являются выпуклость в корне шва и смешение кромок. При контроле прямым лучом это обуславливает появление на экране дефектоскопа ложных эхосигналов от этих дефектов, совпадающих по времени с эхосигналами, отраженными от дефектов над корнем шва, обнаруженных однократно отраженным лучом. Так как эффективный диаметр УЗ пучка соизмерим с толщиной стенки, то отражатель, как правило, не удается идентифицировать по местоположению преобразователя относительно выпуклости шва.

В целях повышения достоверности контроля таких швов было предложено вводить временную селекцию, исключающую из обзора ту часть развертки, на которой возможно появление сигналов от неровностей. При этом при прозвучивании прямым лучом будет пропус-

каться какое-то число дефектов над корнем шва. Однако статистика (>80 % трещин и непроваров находится в корне шва) показывает, что риск от такой системы селектирования невелик и вполне окупается практически полным исключением напрасной браковки. Такая система требует повышенной точности настройки развертки дефектоскопа.

Рис. 16.116 иллюстрирует схему настройки скорости развертки дефектоскопа и методику обнаружения дефектов над корнем шва. Участок развертки *a* является зоной появления эхосигналов от дефектов, расположенных в корне шва; участок *x* – зоной совпадений эхосигналов как от дефектов, расположенных над корнем шва, так и от выпуклости в корне шва. По существу, это зона неуверенного контроля. Участок *δ* соответствует эхосигналам, отраженным от дефектов в верхней части шва. Возможно также появление эхосигналов, отраженных от дефектов левее сигнала *D* или в непосредственной близости от него.

При обнаружении эхосигнала в зоне совпадений дефекты от неровностей в корне шва отличаются по следующим признакам:

- по координате эхосигнала (если обнаружен сигнал вблизи левой границы зоны совпадений и его амплитуда превышает браковочный уровень, то это свидетельствует о наличии недопустимого дефекта);
- по расположению преобразователя относительно линии сплавления шва (сигналы от выпуклости в корне шва обычно выявляются при меньшем расстоянии между преобразо-

вателем и швом, чем при обнаружении дефектов над корнем шва);

– по сопоставлению координат и амплитуды эхосигнала, измеренных с обеих сторон шва (если оба параметра имеют значительное различие, следует считать, что получен сигнал от выпуклости в корне шва);

– по расположению сигнала относительно пространственного положения контролируемого участка шва (в трубныхстыках). На стыках, плоскость которых расположена вертикально, наиболее вероятно появление выпуклости в корне шва в верхней части. На горизонтальных стыках они располагаются более равномерно по периметру и возникают реже.

Смещение кромок стыкуемых элементов может быть ошибочно принято за корневой дефект. Смещение кромок из-за разной толщины элементов характеризуется сигналом, выявленным с одной стороны шва по всей его длине или на большей его части. В этом случае надо измерять толщину стенок. Смещение кромок из-за несоосности стыкуемых труб характеризуется появлением сигналов с разных сторон шва в диаметрально противоположных точках.

При контроле сварных швов следует иметь в виду, что в ОШЗ возможны расслоения металла, затрудняющие определение координат дефекта. В случае обнаружения дефекта при контроле сварного шва зону, в которой он найден наклонным преобразователем, нужно дополнительно проконтролировать прямым преобразователем для уточнения характера дефекта и определения истинного значения его глубины.

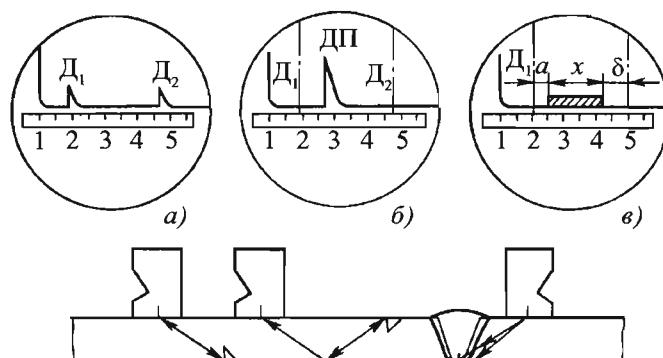


Рис. 16.116. Схема контроля сварных соединений труб толщиной <15 мм:

*a* – настройка скорости развертки; *b* – осциллограмма дефекта;

*c* – разметка экрана после настройки скорости развертки;

*D<sub>1</sub>* и *D<sub>2</sub>* – сигналы соответственно от нижнего и верхнего контрольных отражателей; *D* – сигнал от дефекта;

*П* – сигнал, совпадающий с сигналом от дефекта по координате от выпуклостей в корне шва

В швах, выполненных двусторонней сваркой, как правило, ложные сигналы от задней кромки выпуклости приносят меньше не приятностей, чем в швах, полученных односторонней сваркой. Они меньше по амплитуде благодаря более плавным очертаниям выпуклости и к тому же они дальше по развертке. В этих швах наиболее характерным дефектом являются непровары в корне. Часто эти непровары имеют настолько малое раскрытие (стынутые), что эхосигнал от них очень слабый, так как большая часть энергии звука просачивается через такой непровар. Двусторонние швы с гладкими и пологими выпуклостями можно контролировать при многократном отражении УЗ луча, что в некоторой степени упрощает методику контроля. В этом случае распространение УЗ луча в листе носит уже волноводный характер, что способствует выявлению непроваров.

УЗ контроль сварных швов малых толщин наиболее эффективно осуществлять специальными преобразователями с большими углами ввода ( $\alpha = 70\ldots85^\circ$ ) и малой стрелой на рабочей частоте (4..10 МГц). При контроле трубных стыков широко распространены снабженный фокусирующим протектором преобразователь, который позволяет уменьшать расхождение лучей в металле, и раздельно-смещенные наклонные преобразователи, а для контроля стыков труб – хордовые ПЭП конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В швах толщиной 16..40 мм, выполненных односторонней сваркой, также велик уровень ложных сигналов от выпуклостей в корне.

Если технология сварки такова, что выпуклости не образуются или очень малы, то контроль проводят одним преобразователем прямым и однократно отраженным лучом за один поперечный ход. В этом случае наиболее эффективны преобразователи с  $\alpha = 65\ldots70^\circ$ , рабочая частота которых 2..4 МГц. Если же ложные сигналы от выпуклостей велики, то с целью повышения помехоустойчивости целесообразно контролировать корень шва и его остальную часть раздельно. При этом верхнюю часть шва контролируют преобразователями с  $\alpha = 45\ldots50^\circ$ .

Швы листовых конструкций, выполненных односторонней сваркой без подварки, как правило, имеют весьма неудовлетворительное качество. При сварке в корне шва образуются значительные выпуклости и вогнутости (3..5 мм). Контроль корня такого шва воз-

можен только после удаления всех неровностей шлифовальной машиной.

Швы толщиной >41 мм, как правило, выполняют двусторонней сваркой или односторонней сваркой с подваркой корня. Обычно швы толщиной до 65 мм контролируют только прямыми лучами двумя наклонными преобразователями: корень – преобразователем с  $\alpha = 45\ldots50^\circ$  и верхнюю часть – преобразователем с  $\alpha = 60\ldots70^\circ$ , частота которых 1,8..2,5 МГц. Швы толщиной >65 мм проверяют при  $\alpha = 39\ldots50^\circ$ .

Швы изделий толщиной 120..200 мм контролируют, как правило, прямым лучом с двух поверхностей и двух боковых сторон наклонными преобразователями с рабочей частотой 1,7 МГц и углами  $\alpha$ , равными 50 и  $60^\circ$ , а толщиной >200 мм – с  $\alpha$ , равными 39 и  $50^\circ$ .

При этом преобразователь с  $\alpha = 60^\circ$  используют для прозвучивания слоя толщиной 60 мм, прилегающего к поверхности сканирования. Эти швы также сканируют прямыми преобразователями по удаленной заподлицо выпуклости шва в 3ТВ.

Контроль через антикоррозионную накладку недопустим, так как в последней велик коэффициент затухания УЗ.

Статистика показывает, что в крупноразмерных швах может образовываться 65..70 % шлаковых включений, 10 % пор и 20..25 % плоскостных дефектов (из них трещин 5..7 %). Наиболее опасные дефекты – трещины – ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости. Такие дефекты, расположенные в сечении шва, плохо выявляются при контроле одним преобразователем. Если в швах небольшой толщины, соизмеримой с эффективным диаметром УЗ пучка, суммарная амплитуда эхосигнала от плоскостных дефектов в сечении увеличивается за счет многократного зеркального отражения от дефекта и стенок, то в толстостенных соединениях этот угловой эффект отсутствует. Это приводит к тому, что такие дефекты при наклонном падении на них УЗ волн могут быть выявлены только регистрацией боковых лепестков индикаторы рассеяния, интенсивность которых в десятки раз меньше, чем основного лепестка.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости применения акустической системы «тандем» для обеспечения надежного обнаружения вертикально ориентированных плоскостных дефектов. В то же время при кон-

троле толстостенных соединений, ремонт которых очень дорог, важно не только найти дефект, но и распознать его тип. Для исключения неоправданной браковки необходимо использовать количественные информативные признаки, приведенные выше. Однако оператору в правильной дешифровке качества шва существенно может помочь и знание качественных информативных признаков.

Особенно важным требованием при контроле толстостенных соединений является проведение приемочного контроля только после термообработки, если она предусмотрена технологией. Опыт показывает, что термообработка уменьшает коэффициент затухания УЗ в шве и ОШЗ и способствует раскрытию трещин. Это увеличивает выявляемость дефектов до 30 %.

Контроль до термообработки можно проводить лишь факультативно и использовать его результаты весьма осторожно. Дело в том что ремонт дефектных участков, обнаруженных до термообработки, вызывает сильный нагрев дефектных зон, который, в свою очередь, приводит к раскрытию ранее сжатых и поэтому не выявленных дефектов.

**2. Сварные соединения трубопроводов, выполненные на подкладках или взамок.** Характерной особенностью контроля таких соединений является весьма стабильный сигнал от подкладки (уса). При контроле сварных соединений большой толщины этот сигнал легко отличить от сигналов дефектов, он даже полезен, так как позволяет контролировать качество акустического контакта. Для облегчения дешифровки целесообразно на экране дефектоскопа в месте появления этого сигнала нанести метку тушью или стеклографом.

При контроле малых толщин это отличие затруднено. Существует ряд приемов, позво-

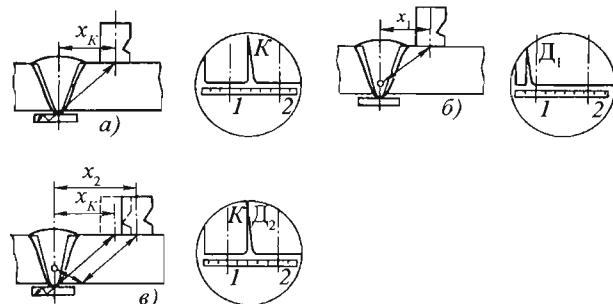
ляющих распознавать эхосигналы от подкладки и дефекта при прозвучивании швов толщиной 7...17 мм.

Дефекты над корнем можно выявить двумя способами: прямым или однократно отраженным лучом (рис. 16.117). В последнем случае время прихода сигналов от подкладки и дефекта может быть одинаковым. Чтобы различить эти сигналы, необходимо измерить линейкой расстояния  $x_1$  и  $x_2$  от точки ввода луча или от передней грани преобразователя до середины шва на испытательном образце.

Сигнал от подкладки появляется при меньшем расстоянии между швом и преобразователем  $x_K$ , чем сигнал от дефекта, расположенного выше корня шва. В процессе контроля следует периодически сравнивать эти расстояния с измеренными на образце.

С помощью прямого преобразователя предварительно сравнивают толщину стенки каждого из стыкуемых элементов с толщиной образца и вносят соответствующую поправку в настройку скорости развертки. Если стыкуемый элемент имеет толщину, большую, чем испытательный образец, то при контроле шва со стороны этого элемента сигнал от подкладки смешается вправо по сравнению с тем же сигналом, полученным на образце. Чтобы определить, к какой из кромок стыкуемых элементов ближе расположен дефект в корне шва, обращают внимание на следующие признаки:

- если дефект в корне шва расположен ближе к линии сплавления с тем же элементом, со стороны которого ведется контроль, то при медленном приближении искателя к шву на экране дефектоскопа первым появится сигнал от дефекта, а затем, когда УЗ лучи пройдут над дефектом, частично экранирующим подкладку, на экране появится сигнал от подкладки;



**Рис. 16.117. Схема контроля стыкового соединения с подкладкой:**  
 а – без дефекта; б – с дефектом прямым лучом; в – с дефектом отраженным лучом;  
 1, 2 – координаты сигналов от зарубок на поверхности образца;  
 К – сигнал от подкладки,  $D_1$  и  $D_2$  – сигналы от дефекта над корнем шва

— при контроле этого участка шва со стороны второго элемента на экране первым возникнет сигнал от подкладки, а затем от дефекта. Возможно также одновременное появление сигналов.

Существует ряд косвенных признаков, позволяющих судить о характере некоторых дефектов в сварных швах толщиной  $H = 7\ldots15$  мм, выполненных на подкладках.

Трешины и непровары по кромкам в корне шва, как правило, начинаются от зазора, образованного кромкой стыкуемого элемента и подкладкой. Распространяясь по наплавленному металлу, они выходят после первого или второго слоя на середину шва. В связи с этим отличительным признаком трещин в корне шва является то, что они частично или полностью экранируют подкладку только при контроле со стороны того из стыкуемых элементов, у кромки которого они начинаются. При контроле шва с противоположной стороны трещина не экранирует подкладку и УЗ лучи свободно входят в нее. На экране дефектоскопа возникают два сигнала: от подкладки и от трещины. Сигнал от подкладки имеет примерно те же амплитуду и пробег на экране, что и на участках, где дефект отсутствует. Трешины с этой стороны выявляются значительно хуже, а при небольшой высоте могут вовсе не обнаруживаться.

Непровар, расположенный выше корня шва, мало или совсем не экранирует подкладку. На экране при контроле с обеих сторон возникают сигналы от подкладки и дефекта. Расстояние между этими сигналами несколько больше расстояния между сигналами от дефектов, находящихся в корне. В некоторых случаях на экране наблюдается несколько сигналов от дефекта и кольца.

Характерная особенность обнаружения шлаковых включений или пор — наличие на экране дефектоскопа импульсов, быстро исчезающих и появляющихся вновь при незначительных перемещениях преобразователя в продольном или поперечном направлении. Скопление мелких шлаковых включений или пор в наплавленном металле дает на экране один сигнал или группу близко расположенных сигналов.

В стыковых и угловых сварных швах часто возникают опасные дефекты, расположенные непосредственно под выпуклостью. Они не выявляются при контроле обычными преобразователями, так как находятся в пределах мертвых зон.

Дефекты, залегающие вблизи поверхности, хорошо обнаруживаются подповерхностными головными волнами, возникающими в металле при углах призмы, равных первому критическому. Отраженные от дефекта головные волны регистрируются по боковой волне, которая возбуждается в граничащей с поверхностью среде, в данном случае — призме приемника. Максимум потока энергии головной волны находится на глубине 4..6 мм. Дефекты на поверхности изделия не выявляются.

На основе использования головных волн разработаны преобразователи, позволяющие:

- вести УЗ контроль подповерхностных слоев, в которые не проникают поверхностные волны;
- обнаруживать дефекты, скрытые под выпуклостью шва;
- выявлять дефекты в массивных конструкциях, к которым угловым швом приварен тонкостенный элемент;
- контролировать аустенитные стали, в том числе антакоррозионную наплавку, и решать ряд других задач.

**3. Угловые, тавровые и нахлесточные соединения.** Контроль таких соединений имеет свою специфику, вызванную геометрией сварного соединения. Основные схемы контроля угловых и тавровых соединений листовых конструкций показаны на рис. 16.118. Наиболее эффективна схема ввода УЗ колебаний через основной металл привариваемого листа, так как она позволяет выявить все виды внутренних дефектов в угловых соединениях при минимальном уровне ложных сигналов. Последние возникают при отражении УЗ от грубых неровностей выпуклостей и в случае контроля угловых швов — от угла элемента конструкции. Эти ложные сигналы можно отличить от сигналов, отраженных от дефектов, селектированием по времени их прихода.

В угловых и тавровых соединениях при доступе со стороны вертикального листа часто применяют прямые раздельно-совмещенные преобразователи для выявления непроваров. Для тавровых соединений также эффективны сдвоенные наклонные преобразователи, обеспечивающие прозвучивание зеркально-теневым способом.

Нахлесточные соединения, как правило, контролируют зеркально-теневым способом (рис. 16.119). При отсутствии дефекта УЗ беспрепятственно проходит от излучателя к приемнику и на экране появляется сигнал

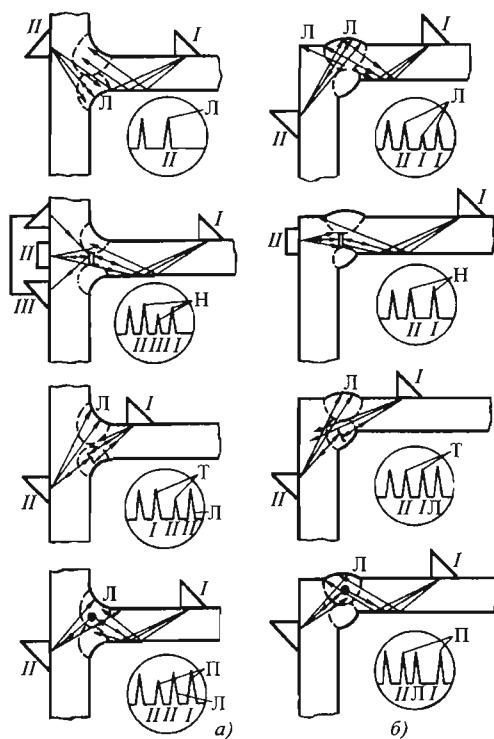


Рис. 16.118. Схемы контроля тавровых (а) и угловых (б) листовых соединений:

Л – ложные эхосигналы от выпуклости и галтельного перехода, зафиксированные преобразователями в положениях I, II, III; Н, Т, П – эхосигналы соответственно от непровара, трещины и поры

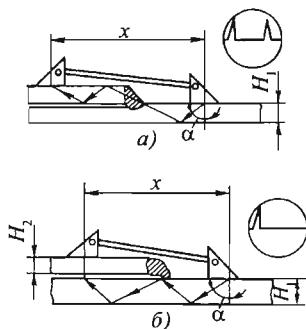


Рис. 16.119. Схемы контроля нахлесточных соединений зеркально-теневым методом

(см. рис. 16.119, а). Если в соединении имеется дефект, то этот сигнал или уменьшается, или исчезает (см. рис. 16.119, б). Для такого контроля необходимы специальные приспособления для закрепления преобразователей на определенном расстоянии друг от друга.

**4. Угловые соединения трубных систем.** При конструкции угловые сварные соединения трубных элементов подразделяются на соединения с полным проплавлением и конструктивным зазором (непроваром). Выбор метода контроля определяется диаметром приварного патрубка (штуцера), возможностью контроля изнутри и наличием конструктивного зазора.

Угловые сварные соединения штуцеров или труб с номинальной толщиной стенки 4,5...65 мм с барабанами, коллекторами, фланцами и т.п. без конструктивного зазора контролируют с наружной стороны штуцера наклонными преобразователями. Угол ввода  $\beta$  и рабочая частота  $f$  зависят от толщины стенки  $H$ .

Преобразователи должны иметь стрелу, обеспечивающую контроль корня шва прямым лучом. Прозвучивание корня шва прямым лучом возможно, если ширина шва не более расстояния между передней гранью преобразователя и проекцией дальней от преобразователя линии сплавления в корне на поверхность штуцера. Если это расстояние не выдерживается, необходимо срезать фаску на передней грани призмы или увеличить угол ввода.

Особенность контроля заключается в том, что угол скоса кромки штуцера изменяется от 0 до 30°. В центре секторов А и В (см. рис. 16.120, а) угол равен 0°, в центре секторов Б и Г (см. рис. 16.120, б) – 30°. Катет шва в секторах А, В может быть в 1,5 – 3 раза больше, чем в секторах Б, Г, поэтому при сканировании необходимо учитывать, что при попадании прямым лучом в корень шва и однократно отраженным лучом в выпуклость шва расстояние между передней гранью преобразователя и краем выпуклости будет неодинаковым в различных секторах шва.

При контроле сварных соединений с толщиной стенки штуцера <20 мм точно измерить координаты дефекта не удается, поэтому о наличии дефектов судят по расположению преобразователя относительно края выпуклости шва.

На внутренней стороне штуцера после удаления подкладного кольца могут остаться неровности (риски, впадины, бугры), которые способны дать ложные сигналы. Признаком неровностей внутренней поверхности штуцера является несоответствие положения эхосигнала на развертке положению преобразователя на поверхности штуцера. Если на экране появляется эхосигнал у левой границы рабочей зоны развертки, а преобразователь при этом находится в таком положении, что луч не может попасть в корень шва, то считают, что обнаружена неровность внутренней поверхности.

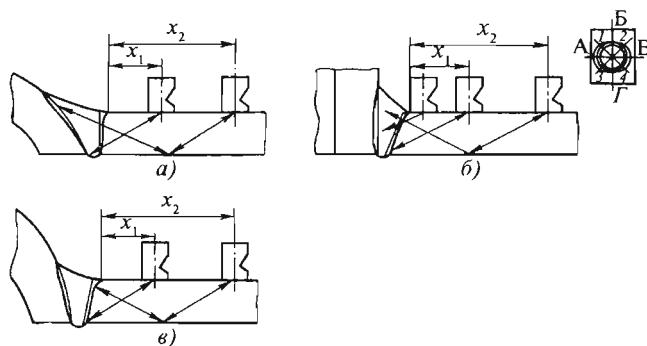


Рис. 16.120. Схемы контроля углового сварного соединения:  
а – в секторах А и В; б – в секторах Б и Г; в – в промежуточных секторах I – 4

При контроле сварных соединений с толщиной стенки штуцера 40...50 мм в центре секторов Б и Г (см. рис. 16.120) может наблюдаться эхосигнал от двухгранных углов внутри трубы. Признаком принадлежности сигнала двухгранным углам является то, что сигнал находится на экране у левой границы рабочей зоны развертки, а преобразователь при этом вплотную придвигнут ко шву.

Особенность контроля сварного соединения с неудаленным подкладным кольцом – наличие в рабочей зоне экрана дефектоскопа эхосигнала от подкладного кольца. Кромки кольца в разных секторах удалены от корня шва на различные расстояния: наибольшее – в секторах Б и Г и наименьшее – в секторах А и В, поэтому максимальный эхосигнал от кольца в секторах А и В обнаруживается при меньших расстояниях от точки ввода до шва, а в секторах Б и Г – при больших.

Трубы малого диаметра (28...42 мм) с толщиной стенки 4...8 мм контролируют специальными преобразователями с  $\beta = 53^\circ$  и  $f = 5$  МГц с неортогональным вводом УЗ. Сущность контроля заключается в том, что акустическая ось преобразователя находится не в одной плоскости с образующей трубы, как в обычных призматических преобразователях, а составляет с ней угол  $25^\circ$ . Благодаря этому отсутствуют мешающие сигналы от двухгранных углов, образованного внутренней поверхностью и торцом трубы (рис. 16.121). Кривизна контактной поверхности преобразователей должна соответствовать кривизне контролируемой трубы. Контроль проводят раздельно двумя преобразователями с левым и правым направлением оси.

Необходимо отметить, что УЗ (так же, как и радиографический) контроль угловых соединений с конструктивным зазором имеет низкую достоверность.

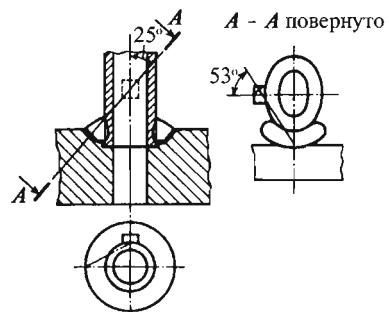
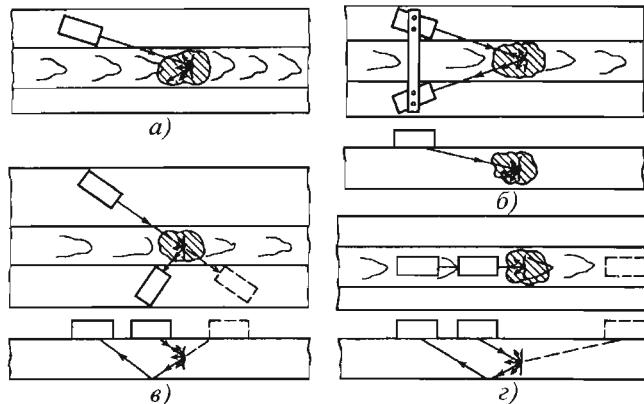


Рис. 16.121. Схема прозвучивания штуцера преобразователем с неортогональным углом ввода

Весьма специфичная задача УЗ контроля сварных соединений – выявление поперечных трещин. Эти трещины возникают в стальных, склонных к трещинообразованию при грубых нарушениях сварочной технологии. В нетермообработанных изделиях очень часто образуются поперечные трещины только через несколько дней после сварки, что особенно неприятно, так как к этому времени контроль уже проведен. Поперечные трещины обнаруживаются, как правило, в наплавленном металле и ЗТВ поперек шва в вертикальной плоскости. Наиболее часто они возникают в корнях швов, выполненных двусторонней сваркой без подогрева.

Поперечные трещины имеют слабошероховатую поверхность, поэтому отражение УЗ от них носит в основном зеркальный характер. Это затрудняет их обнаружение.

Схема прозвучивания одним преобразователем – самый простой, но наименее надежный способ (рис. 16.122, а). Его применение оправдано только для контроля швов небольшой толщины (до 20 мм), когда проявляется



**Рис. 16.122. Схемы обнаружения поперечных трещин в швах, имеющих выпуклость (а – в) и без нее (г):**  
а – эхометодом одним преобразователем; б, в – эхометодом двумя преобразователями, соответственно прямым и однократно отраженным лучами; г – эхозеркальным методом

волноводный эффект, способствующий (за счет многократного переотражения от стенок) концентрации энергии поля, отраженного от дефекта. Тем не менее, контроль одним преобразователем нужно проводить на очень высокой чувствительности, что часто приводит к значительной перебраковке по другим мелким дефектам или даже структурным шумам.

Большая выявляемость трещин достигается при использовании двух преобразователей, расположенных под углом к шву (см. рис. 16.122, б). Такое размещение способствует регистрации максимального по амплитуде зеркального сигнала. Для повышения помехоустойчивости преобразователи желательно включать по раздельной схеме.

Наиболее рационально применять эту схему для толщин  $<20$  мм. Для контроля швов большей толщины можно использовать эхозеркальный способ прозвучивания при размещении преобразователей по обеим сторонам выпуклости (см. рис. 16.122, в). Преобразователи, как правило, включают по раздельной схеме. Достоверность контроля высокая, так как геометрия прозвучивания обеспечивает регистрацию максимального эхосигнала. Но эта схема громоздка, требует хорошего конструктивного исполнения приспособлений для крепления преобразователей.

Во всех случаях необходимо выбирать такие параметры преобразователя и такую его ориентацию, чтобы угол встречи луча с дефектом был далек от третьего критического.

**Контроль наплавок на кромки и антикоррозионных наплавок.** УЗ контроль аусте-

нитной наплавки под сварку на кромках деталей из стали перлитного класса и перлитной наплавки под сварку на кромках деталей из подкаливающихся сталей перлитного класса проводят для выявления трещин, отрывов наплавки, непроваров, шлаковых включений и пр. Поскольку ориентация этих дефектов различна, контроль осуществляют как наклонными, так и прямыми совмещенными и раздельно-совмещенными преобразователями со стороны основного металла.

Антикоррозионную наплавку контролируют на наличие несплавлений на границе совмещенными и раздельно-совмещенными преобразователями. Если толщина наплавки  $>6$  мм, то контроль осуществляют преобразователями со стороны основного металла, если  $<6$  мм, – то со стороны наплавки.

При контроле наплавок продольными и поперечными волнами эхосигнал от границы сплавления возникает даже при высококачественной сварке. Это объясняется различием упругих свойств и, следовательно, акустических импедансов основного металла и наплавки. В случае аустенитной наплавки коэффициент отражения от границы выше и эхосигнал больше, чем при перлитной наплавке. Поэтому браковочный уровень чувствительности устанавливается выше, чем сигнал помехи, и различен для перлитной и аустенитной наплавок. Для оборудования АЭС он составляет соответственно 4 и 7 мм<sup>2</sup>.

Скорость развертки и чувствительность дефектоскопа настраивают по плоскодонным отверстиям в испытательных образцах с на-

плавкой, выполненной по штатной технологии. Толщина наплавки такая же, как на изделии. В одном образце плоскодонное отверстие сверлят со стороны основного металла, в другом – со стороны наплавки. Дно отверстия должно совпадать с границей наплавки.

Для настройки чувствительности выбирают образец, соответствующий направлению прозвучивания изделия. Браковочным критерием является большая эквивалентная площадь дефекта, чем заданная нормативной документацией.

Антикоррозионную наплавку в целях обнаружения вертикальных трещин на границе сплавления дополнительно контролируют головными волнами. Эти трещины, как правило, ориентированы в плоскости, ортогональной направлению перемещения ленты-электрода, и сосредоточены в зонах перекрытия соседних валиков. Для контроля используют наклонные раздельно-совмещенные преобразователи головных волн с  $\beta_{kp1} = 29^\circ 30'$ ,  $f = 1,8\dots 2,5$  МГц. Браковочный уровень чувствительности настраивают по плоскодонному отверстию диаметром 4 мм, ось которого лежит параллельно поверхности на 1…1,5 мм ниже границы сплавления (рис. 16.123).

Сканирование проводят по поверхности наплавки параллельно ходу наплавочной ленты или наплавочного электрода, при этом прозвучивание идет в двух противоположных направлениях. Баллом 1 оценивают дефекты, амplitуды эхосигналов от которых равны или больше браковочного уровня чувствительности.

**Контроль аустенитных швов.** Сложность УЗ контроля указанных соединений связана с высоким уровнем структурных помех, большим затуханием и аномальным распространением УЗ.

Применение традиционного метода контроля наклонными совмещенными преобразователями далеко не всегда обеспечивает необходимое отношение полезный сигнал/помеха, равное 6 дБ. Это приводит к тому, что на фоне сигналов структурных помех на экране дефектоскопа практически невозможно различить эхосигналы от дефектов.

Особенности контроля изделий из аустенитных сталей известны из литературы.

Анализ отечественных и зарубежных исследований, а также результатов, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показывает, что для УЗ контроля аустенитных сварных швов целесообразно использовать наклонные раздельно-совмещенные ПЭП. При контроле сварных швов толщиной 6…20 мм более эффективно применение наклонных раздельно-совмещенных ПЭП на поперечные волны с углом ввода  $\alpha \approx 65^\circ$  и углом между направлениями излучения и приема (угол разворота)  $\Delta = 20^\circ$ .

Для дефектоскопии изделий из аустенитных сталей толщиной 20…50 мм наибольшая чувствительность достигается при прозвучивании наклонными раздельно-совмещенными ПЭП на продольные волны с углом ввода  $\alpha = 40\dots 70^\circ$  и  $\Delta = 20\dots 60^\circ$ .

Методика контроля наклонными раздельно-совмещенными ПЭП практически мало отличается от традиционной методики с использованием совмещенных ПЭП. Для настройки чувствительности, установки рабочей зоны развертки, настройки глубиномера следует применять СОП обязательно со сварными швами, по своим акустическим свойствам, шероховатости поверхности, толщине и форме, ширине выпуклости практически тождественными штатным сварным соединениям. В качестве контрольных отражателей применены боковые отверстия и вертикальное сверление, выполненные в металле сварного шва (рис. 16.124).

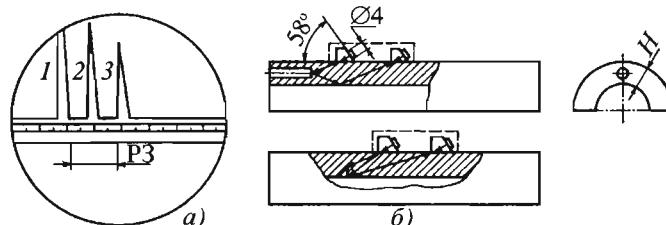


Рис. 16.123. Настройка чувствительности и скорости развертки дефектоскопа при контроле антикоррозионной наплавки головными волнами:

а – расположение сигналов на экране при настройке скорости развертки; б – испытательный образец;  
1 – сигнал от передней грани искателя; 2 – сигнал от плоскодонного отражателя;  
3 – сигнал от зарубки; РЗ – рабочая зона

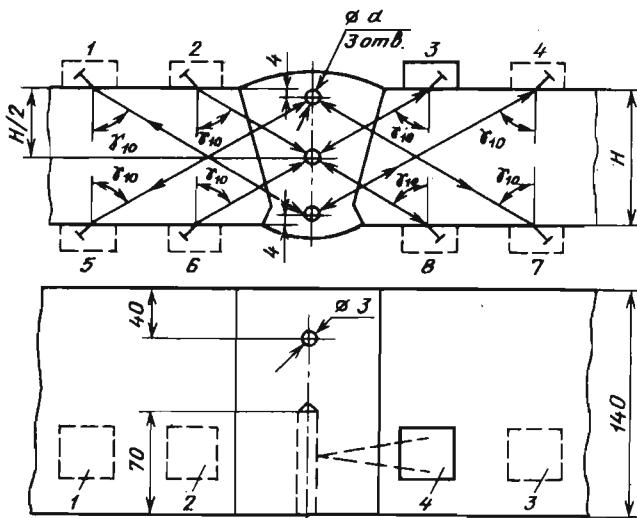


Рис. 16.124. СОП для настройки чувствительности и скорости развертки:  
1 – 8 – положения ПЭП при настройке чувствительности и скорости развертки;  
 $\gamma_{10}$  – условный угол ввода раздельно-совмещенных ПЭП

Контроль продольными волнами следует проводить прямым лучом по возможности с четырех сторон, контроль поперечными волнами – прямым и однократно отраженным лучами с двух сторон. Учитывая анизотропию акустических свойств металла швов, настройку чувствительности надо выполнять так: при контроле с двух (четырех) сторон определить значения амплитуд эхосигналов от боковых отверстий с каждой стороны и минимальное из них принять за браковочную. Настройку глубиномера и установку рабочей зоны экрана ЭЛТ также следует проводить по боковым отверстиям с каждой стороны шва. Для того чтобы исключить возможные ошибки при определении положения дефекта в направлении продольной оси шва в СОП предусмотрены вертикальные отверстия.

Поправку определяют, перемещая ПЭП так, чтобы получить максимальную амплитуду эхосигнала от вертикального отверстия. Если максимум эхосигнала соответствует положению, при котором ось ПЭП находится напротив оси сверления, то поправку вводить не требуется. Если максимум эхосигнала отвечает положению, в котором ось ПЭП не пересекает ось сверления, то при определении местоположения дефекта следует вводить поправку, значение которой равно расстоянию между осью ПЭП и осью сверления. Поправка берется со знаком «+», если ПЭП смещен относительно сверления

в направлении сварки, или со знаком «–», если он смещен в противоположную сторону.

При определении координат дефектов желательно сопоставлять результаты, полученные при контроле с разных сторон шва на штатном изделии и на образце.

## 16.5. МАГНИТНАЯ И ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

### 16.5.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменить свои магнитные характеристики под воздействием внешнего магнитного поля. Основными параметрами постоянного магнитного поля являются **магнитная индукция**  $B$ , характеризующая плотность магнитного потока, и **напряженность магнитного поля**  $H$ .

Эти характеристики связаны между собой следующим соотношением  $B = \mu_0 \mu H$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость в воздухе, Г/м;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала. В зависимости от значения  $\mu$  все материалы подразделяются на три группы:

- диамагнитные, у которых  $\mu$  на несколько миллионов меньше единицы (меди, цинка, серебра и др.);

- парамагнитные, у которых  $\mu$  на несколько миллионов или тысячных долей больше единицы (марганец, платина, алюминий);
- ферромагнитные, у которых  $\mu$  достигает нескольких десятков тысяч (железо, никель, кобальт и некоторые сплавы).

Принципиальное отличие ферромагнитных материалов от других веществ заключается в отсутствии линейной зависимости магнитного состояния материала от напряженности магнитного поля (рис. 16.125).

Сначала индукция [кривая  $B = f(H)$ ] растет медленно, затем быстро, и, наконец, при  $H_s$  наступает магнитное насыщение  $B_s$ . Кривую  $B = f(H)$  называют кривой первоначального намагничивания (индукции), а кривую  $\mu_d = f(H)$  – кривой магнитной проницаемости. Она показывает зависимость относительной дифференциальной проницаемости  $\mu_d$  от напряженности магнитного поля  $H$ .  $\mu_d$  является весьма важной характеристикой материала с позиций дефектоскопии и определяется выражением  $\mu_d = \lim \Delta B(\mu_0 \Delta H)$ .

Наилучшими условиями обнаружения дефектов являются такие, при которых магнитная проницаемость мала, а индукция велика. Такое магнитное состояние может быть достигнуто в магнитных полях, превышающих поле  $H_{\mu \max}$ , т.е. на участке кривой  $\mu_d = f(H)$ , где проницаемость убывает. Если начальное намагничивание металла таково, что точка  $P$  оказывается слева от точки  $\mu_d$  на кривой магнитной проницаемости, то уменьшение попечерного сечения металла за счет дефекта вызовет увеличение магнитной индукции, а также может привести к более высокой магнитной проницаемости, в результате дефект может быть не обнаружен. Эти обстоятельства необходимо учитывать при выборе режимов намагничивания материалов.

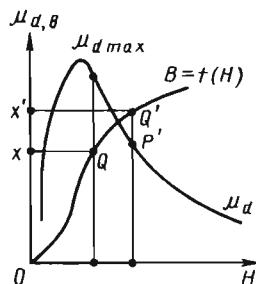


Рис. 16.125. Зависимость  $B$  и  $\mu_d$  от  $H$  для ферромагнитного материала

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного вида контроля: магнитопорошковый (МП), магнитографический (МГ), феррозондовый (ФЗ), эффекта Холла (ЭХ), индукционный (И), пондеромоторный (ПМ), магниторезисторный (МР). С их помощью можно проконтролировать: сплошность (методами дефектоскопии): (МП, МГ, ФЗ, ЭХ, И); размеры (ФЗ, ЭХ, И, ПМ); структуру и механические свойства (ФЗ, ЭХ, И).

Из перечисленных методов только МП требует обязательного участия в контрольных операциях человека; остальные позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов, что делает возможным полную автоматизацию процессов контроля. Отметим, что МП и МГ обнаружения несплошностей являются контактными, т.е. требуют соприкосновения преобразователя (магнитный порошок или магнитная лента) с поверхностью изделия; при остальных методах контроля съем информации осуществляется бесконтактно (хотя и на достаточно близких расстояниях от поверхности).

С помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины и другие поверхностные дефекты шириной раскрытия в несколько микрометров. Такие методы, как ФЗ, ЭХ, И, МГ, можно использовать на грубых поверхностях, при этом минимальная глубина выявляемых дефектов составляет трехкратную высоту шероховатостей поверхности. В связи с необходимостью сканировать поверхность изделия методы ФЗ, ЭХ, И особенно удобно применять для контроля цилиндрических изделий. Метод МГ успешно используют для контроля сварных швов.

**Обнаружение дефектов магнитными методами.** Магнитные методы контроля ферромагнитных металлов основаны на обнаружении локальных возмущений поля, создаваемых дефектами в намагниченном изделии. Магнитный поток, распространяясь по изделию и встречая на своем пути поверхностный дефект, огибает его вследствие того, что магнитная проницаемость дефекта значительно ниже (в 1000 раз) магнитной проницаемости основного металла. Это можно пояснить следующим образом (рис. 16.126).

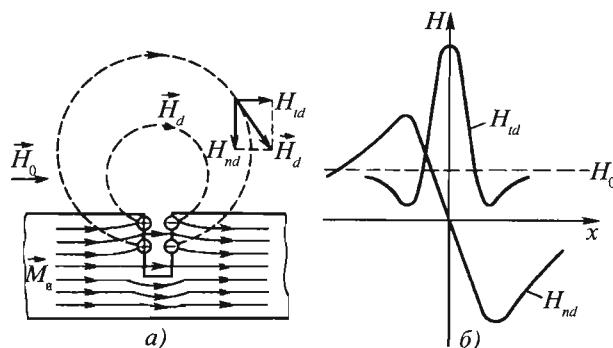


Рис. 16.126. Распределение намагниченности  $M_a$  в ферромагнитном изделии и поля рассеяния  $H_d$  над поверхностным дефектом (а), а также топография (б) тангенциальной  $H_{td}$  и нормальной  $H_{nd}$  составляющих напряженности поля поверхностного дефекта

Часть магнитосиловых линий обрывается на одной грани дефекта и снова начинается на другой. Конец каждой линии можно рассматривать как некоторый положительный магнитный заряд, а начало на другой линии – как отрицательные магнитные заряды. Каждый магнитный заряд создает магнитное поле, направленное из него как из центра. Суммарное поле магнитных зарядов  $H_d$  называют **полем дефекта**. Поле  $H_d$  имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, которое складывается из внешнего намагничивающего поля  $H_0$  и поля дефекта  $H_d$ , становится неоднородным и имеет сложную картину.

Амплитудные значения составляющих  $H_{td}$  и  $H_{nd}$  поля дефектов зависят от: их размеров и ориентации по отношению к внешнему полю; соотношения проницаемостей среды и дефекта; расстояния до точки наблюдения. Чем больше размеры дефекта и ближе к нему точка наблюдения и чем больше различие проницаемостей, тем больше амплитудные значения составляющих полей дефектов.

Вектор намагничивающего поля должен быть направлен перпендикулярно к плоскости дефекта, тогда поле дефекта по направлению совпадает с внешним полем и будет иметь максимальное значение. В противном случае поле  $H_d$  ориентируется в направлении нормали к стенкам трещины, а интенсивность его быстро убывает с увеличением угла между нормалью и направлением намагничивания.

Следует подчеркнуть, что магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектами, но и над любыми локальными изменениями однородности магнитных свойств. Интенсивность поля рассеяния в этом случае зависит от соотношения проницаемостей.

Для регистрации полей рассеяния или возмущения создаваемых дефектами в намагнченном изделии наибольшее распространение получили индукционные, феррозондовые, холловские и магниторезисторные преобразователи.

**Магнитная индукционная головка** представляет собой катушку (рис. 16.127), на концах которой в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится мгновенная электродвижущая сила (ЭДС). Локальный магнитный поток  $\Phi_r$  носителя 1 через головку разветвляется на поток  $\Phi_r$ , проходящий через кольцевой сердечник 2 и взаимодействующий с обмоткой 3, и поток  $\Phi_s$ , минуяющий сердечник.

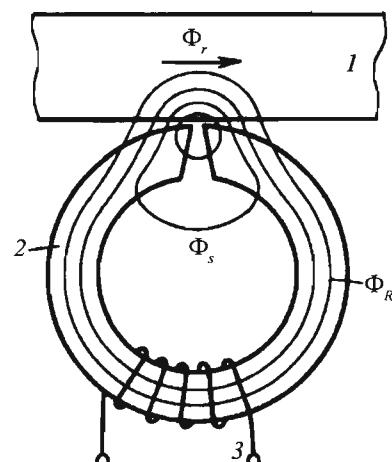


Рис. 16.127. Разветвление локального магнитного потока  $\Phi_r$

**Ферророндовые преобразователи** представляют собой два пермаллоевых сердечника с первичными обмотками возбуждения и вторичными измерительными обмотками на каждом. Они предназначены для измерения напряженности магнитного поля. Их действие основано на нелинейности кривых намагничивания сердечников из магнитных материалов. При создании в первичной обмотке поля возбуждения  $H(t)$  в сердечнике возникает индукция  $B(t)$ , которая индуцирует ЭДС.

**Преобразователи Холла** работают по принципу возникновения ЭДС в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием сил Лоренца. Промышленность выпускает кремниевые, германиевые и арсенидгалиевые преобразователи.

**Магнитные порошки** служат для визуального определения магнитных полей рассеяния над дефектами в МП дефектоскопии. Следует иметь в виду, что во внешнем (намагничающем) поле частицы обычно не существуют изолированно, а вследствие магнитной коагуляции образуют цепочки, длина которых определяется многими причинами, в том числе длительностью воздействия поля, вязкостью среды, в которую помещен порошок, и т.д.

Применяемые в дефектоскопии порошки по составу, физическим свойствам и назначению подразделяются на четыре вида:

- железные, получаемые термическим разложением пентакарбонила железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  или диспергированием железа электрической дугой в керосине;
- получаемые в шаровых мельницах измельчением окалины, возникающей при горячей обработке стали;
- технического и синтетического магнетика;
- ферромагнитного оксида железа, получаемые окислением магнетика.

Наибольшее распространение получили черный магнитный порошок, представляющий собой измельченную оксид-закись железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и буровато-красный порошок –  $\gamma$ -оксид железа ( $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$ ).

Для контроля деталей с темной поверхностью используют светлые порошки (с добавлением алюминиевой пудры ПАК-3) либо люминесцентные магнитные порошки. Распространенный люминесцентный магнитный порошок на 100 г  $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$  содержит 15 г люминофора-

люмогена светло-желтого цвета. Люминесцентные порошки используют при контроле как по темным, так и по светлым поверхностям, но при этом место контроля должно быть оборудовано УФ освещением.

Большое значение имеет размер частиц порошка. Средний размер одного зерна 0,1... 60 мкм. Магнитные пасты для разведения в жидкости кроме порошков содержат различные смачивающие, антикоррозионные и другие присадки.

Для улучшения условий осаждения порошка над дефектом применяют магнитные суспензии, представляющие собой взвесь магнитных частиц в жидкой среде. В большинстве случаев используют водные и масляные магнитные суспензии.

**Магнитные ленты** применяют в МГ дефектоскопии. Двухслойные ленты состоят из немагнитной основы (ацетилцеллюлозы, поливинилхлорида, лавсана) и магнитоактивного слоя – порошков оксида железа, взвешенного в лаке, обеспечивающего хорошую адгезию с основой. Для изготовления рабочего слоя используют  $\gamma$ -оксиды железа ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), железо-кобальтовый феррит ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ), диоксид хрома ( $\text{CrO}_2$ ). В однослойных лентах магнитный порошок вводится непосредственно в основу (резина, полиамидные смолы). Однослойные ленты получили меньшее распространение из-за невысоких механических свойств.

Известно применение гибких слоев и валиков (на основе эластичных материалов: резины, пластмассы и др.), а также специальных металлических лент, изготовленных с учетом требований магнитографического контроля. Металлические ленты отличаются повышенной прочностью и термической стойкостью.

**Способы намагничивания и размагничивания.** Магнитный контроль можно проводить способами приложенного магнитного поля или остаточной намагниченности. **Способ приложенного магнитного поля** используют в тех случаях, когда:

- деталь выполнена из магнитомягкого материала, например из сталей (Ст3, сталь 10, сталь 20 и др.);
- деталь имеет сложную форму;
- деталь контролируют для обнаружения подповерхностных дефектов, расположенных на глубине  $>0,01$  мм;
- мощность дефектоскопа не позволяет намагничивать всю деталь вследствие ее больших размеров.

Контроль в приложенном магнитном поле не всегда обеспечивает более высокую чувствительность, чем чувствительность контроля на остаточной намагниченности.

При контроле на остаточной намагниченности деталь предварительно намагничивают, а после снятия намагничающего поля на ее поверхность наносят магнитную суспензию или порошок. Контроль на остаточной намагниченности возможен при достаточно большой остаточной намагниченности деталей. Поэтому его применяют для проверки деталей из магнитотвердых материалов, у которых величина коэрцитивной силы  $H_c > 800 \text{ A/m}$ . Если деталь выполнена из материала с  $H_c < 800 \text{ A/m}$ , способ остаточной намагниченности применять нельзя, так как над дефектом образуются слабые магнитные поля. Поэтому необходимо применять приложенное поле.

Способ остаточной намагниченности обладает следующими преимуществами:

- возможностью установки детали в любое требуемое положение для хорошего освещения поверхности и осмотра невооруженным глазом;
- меньшей опасностью прожога деталей в листах и контакта с головками дефектоскопа, так как для остаточного намагничивания ток пропускают по детали кратковременно ( $0,1 \dots 0,5 \text{ с}$ ) с перерывами между включениями  $1 \dots 2 \text{ с}$ .

В практике магнитного контроля существуют следующие способы намагничивания изделий (табл. 16.8): комбинированный, циркулярный и полюсный (продольный). Комбинированное намагничивание осуществляется только в приложенном магнитном поле, циркулярное и полюсное можно применять как в приложенном магнитном поле, так и на остаточной намагниченности.

**Комбинированное намагничивание** выполняют при одновременном намагничивании детали двумя или несколькими магнитными полями. Примером комбинированного намагничивания может быть намагничивание трубы соленоидом и пропускание тока через проводник, проходящий внутри трубы. В результате два поля слагаются в результирующее, силовые линии которого направлены по винтовым линиям. Такое поле проходит через все части объекта под различными углами направления, что дает возможность повысить выявляемость дефектов, ориентированных различным образом.

**Циркулярное намагничивание** применяют для выявления продольных дефектов типа

трещин, непроваров, вытянутых шлаковых включений. Его осуществляют при пропускании тока по контролируемой детали или через проводник, помещенный в отверстие детали.

Наиболее эффективно циркулярное намагничивание при контроле цилиндрических деталей. Силу тока (в амперах) для циркулярного намагничивания пропусканием тока по детали цилиндрической формы рассчитывают по формуле  $I = H\pi D$ , где  $H$  – напряженность поля,  $\text{A/cm}$ ;  $D$  – диаметр детали, см.

Ток (в амперах), необходимый для циркулярного намагничивания пластин, определяют по формуле  $I = 2H(b + S)$ , где  $b$  – ширина пластины, см;  $S$  – толщины пластины, см. Если  $H = 800 \text{ A/cm}$ , то  $I = 1600(b + S)$ .

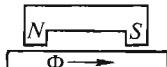
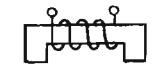
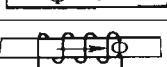
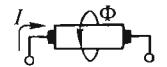
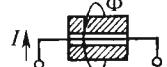
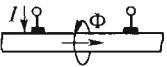
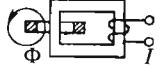
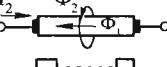
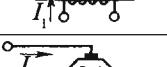
**Полюсное намагничивание** подразделяют на продольное, поперечное и нормальное. При продольном намагничивании направление намагничающего поля совпадает с направлением оси детали. Продольное намагничивание осуществляют с помощью электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов. Для продольного намагничивания изделий кольцевой формы применяют гибкий кабель, навитый на изделие с числом витков  $W$ , при этом намагничающий ток  $I = 2\pi H / W$ .

Этот способ намагничивания используют для обнаружения поперечных дефектов, расположенных под углом  $\geq 20 \dots 30^\circ$  к продольной оси шва. При поперечном намагничивании направление вектора напряженности магнитного поля перпендикулярно к продольной оси шва. Нормальное намагничивание – частный случай продольного и поперечного намагничиваний.

Чувствительность магнитного метода на продольной остаточной намагниченности существенно зависит от скорости снятия намагничающего поля. При быстром уменьшении напряженности поля дефекты выявляются хорошо, при медленном уменьшении поля той же напряженности дефекты не обнаруживаются или обнаруживаются слабо. Время уменьшения тока от максимального значения до нуля не должно превышать 5 мкс.

После контроля изделие размагничивают (если это оговорено в технических условиях). Любое размагничивание, кроме нагревания выше точки Кюри ( $720 \dots 750^\circ\text{C}$ ), независимо от способа его осуществления сводится к периодическому изменению величины и направления магнитного поля, в котором находится деталь, с постепенным уменьшением этого поля до нуля. Обычно применяют следующие способы размагничивания:

## 16.8. Основные способы намагничивания

Намагничивание	Средство намагничивания	Графическая схема намагничивания
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	
	Электромагнитом	
	Соленоидом	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	
	Посредством провода с током, помещаемого в отверстие детали	
	С помощью контактов, устанавливаемых на деталь	
	Индуктированием тока в детали	
Комбинированное	Пропусканием тока по детали и с помощью электромагнита	
	Пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по детали во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Индуктированием тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие детали	

– медленное протаскивание намагниченной детали через отверстие катушки, питаемой переменным током промышленной частоты (50 Гц). Деталь удаляют на расстояние  $\geq 1$  м от катушки, в этом случае переменное поле, обладая ограниченной глубиной проникновения, эффективно размагничивает только поверхностный слой детали;

– пропускание переменного тока, равного намагничивающему, непосредственно

через деталь с постепенным уменьшением его до нуля;

– коммутацию постоянного тока в соленоиде или обмотках электромагнита с постепенным снижением тока до нуля;

– с помощью электромагнита, питаемого переменным током, который постепенно снижают до нуля.

Последний способ размагничивания можно применять при контроле деталей с по-

мощью приставных электромагнитов. Наилучшие результаты при размагничивании получают в том случае, когда его проводят с применением тех же средств, которыми намагничивали изделия. Начальное поле размагничивания должно быть не меньше поля, действующего на деталь при намагничивании. Ток не должен выключаться, когда деталь находится внутри размагничивающего устройства или в сфере влияния поля. При размагничивании нужно стремиться к тому, чтобы направления намагничивающего и размагничивающего полей в детали совпадали, тогда для снятия остаточной намагниченности требуется меньшее магнитное поле.

#### 16.5.2. МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ МЕТОД

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) в системе неразрушающих методов контроля занимает одно из ведущих мест. Это связано с ее высокой чувствительностью к поверхностным и подповерхностным дефектам, простотой, универсальностью и наглядностью представления результатов контроля. МПД применяют для контроля изделий, деталей, сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью  $\geq 40$  с целью выявления невидимых невооруженным глазом поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности типа трещин, непроваров.

Этот метод основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами в детали при ее намагничивании, с помощью ферромагнитных частиц (магнитного порошка), который находится во взвешенном состоянии в дисперсионной среде или воздухе. На магнитную частицу в неоднородном магнитном поле дефекта действует сила стремящаяся затянуть ее в места наибольшей концентрации силовых линий и приблизить к месту дефекта.

Под действием силы происходит перемещение частицы и образуется валик порошка над дефектом. Таким образом, эффективность выявления дефекта находится в тесной связи с интенсивностью поля рассеяния и его градиентом, а также зависит от магнитных свойств и размеров используемых частиц.

Величина поля рассеяния и его градиент максимальны, когда дефект выходит на поверхность изделия. В этом случае значительная часть силовых линий выходит на поверхность изделия в окрестности дефекта. Если дефект

подповерхностный, то часть вытесненных силовых линий будет принята наддефектной частью изделия и поток рассеяния будет небольшим.

Для обнаружения дефекта с помощью магнитного порошка необходимо, чтобы поле рассеяния  $H_d$  превышало некоторое критическое значение  $H_{d\text{ кр}}$ , начиная с которого, частицы порошка хорошо втяиваются в дефект и осаждаются над ним.  $H_d$  определяется отношением индукции материала контролируемого изделия к дифференциальной магнитной проницаемости, а также геометрическими параметрами дефекта.

Согласно ГОСТ 21105-87 все выявляемые поверхностные дефекты подразделяются на три группы, которым соответствуют условные уровни чувствительности А, Б и В (табл. 16.9).

Каждому уровню соответствует определенное значение  $B_m / \mu_d$ , при котором выполняется условие выявления дефекта указанных выше размеров, т.е. условие  $H_d / H_{d\text{ кр}}$ , причем это отношение тем больше, чем меньше размеры дефекта, который необходимо обнаружить (чем выше требуемая чувствительность контроля). Допускается проведение МПД с чувствительностью не ниже условного уровня В. Этому уровню соответствует магнитное состояние материала контролируемого изделия в области перегиба кривой индукции  $B = f(H)$ . Условному уровню чувствительности А отвечает состояние, близкое к техническому насыщению, когда  $\mu \rightarrow 1$ .

Однако следует помнить, что по мере приближения к этому состоянию на незначительных неровностях поверхности изделия уже появляются поля рассеяния, которые затрудняют выявление самого дефекта. Поэтому важное значение для достоверности контроля имеет качество обработки поверхности. Уровень чувствительности А достижим при шероховатости поверхности не грубее  $R_a = 1,6 \text{ мкм}$ , а уровни чувствительности Б и В – не грубее  $R_a = 6,3 \text{ мкм}$ .

#### 16.9. Выявляемые поверхностные дефекты

Размеры эталонного дефекта, мкм	Уровень чувствительности		
	А	Б	В
Ширина	2,5	10	25
Длина		>0,5	
Глубина	25	100	250

Для всех уровней чувствительности введены оптимальные режимы намагничивания, которые рекомендуется рассчитывать по предложенным в ГОСТ 21105–87 формулам в зависимости от магнитных характеристик материала контролируемого изделия. Например, необходимое намагничивающее поле для режима чувствительности  $B$  рассчитывают по формуле  $H_{\text{пр}} = 21 + 1,1H_c$ .

**Чувствительность контроля.** Чувствительность МП метода зависит от ряда факторов:

- размера частиц порошка и способа его нанесения;
- напряженности приложенного намагничивающего поля;
- рода приложенного тока (переменный или постоянный);
- формы и глубины залегания дефектов;
- от их ориентации относительно поверхности изделия и направления намагничивания, состояния и формы поверхности, способа намагничивания.

Частицы порошка должны иметь размер 5...10 мкм. Для выявления глубоко залегающих дефектов применяют более крупный магнитный порошок, для магнитных суспензий (мокрый метод) – порошок с мелкими частицами. Кроме того, частицы магнитного порошка должны обладать максимальной подвижностью. С этой целью необходимо применять частицы неправильной формы. Дополнительную подвижность частицы магнитного порошка получают после покрытия их пигментом с низким коэффициентом трения.

Намагничивание постоянным или переменным током, а также сухой или мокрый метод нанесения порошка существенно не влияют на обнаружение поверхностных дефектов (рис. 16.128). Однако род тока намагничивания и метод нанесения порошка сильно скаживаются на обнаружении подповерхностных дефектов. В этом случае редко выявляется преимущество постоянного тока над переменным, что объясняется созданием при постоянном токе магнитного поля, глубоко проникающего в металл. Но детали с толщиной стенки 20 мм не следует намагничивать постоянным током, поскольку такие детали невозможно размагнитить после контроля.

При намагничивании переменным током из-за так называемого скин-эффекта плотность тока, а следовательно, и плотность магнитного потока будет больше у поверхности намагничиваемого изделия. По этой причине при намагничивании переменным током лучше выявляются только поверхностные дефекты.

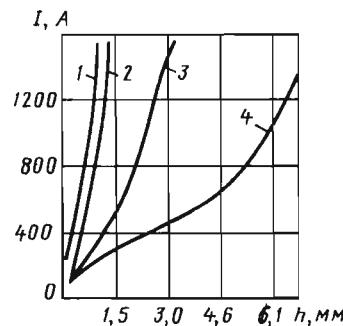


Рис. 16.128. Зависимость чувствительности МП метода от вида тока и способа нанесения порошка:

- 1 – переменный ток, мокрый метод;
- 2 – переменный ток, сухой метод;
- 3 – постоянный ток, мокрый метод;
- 4 – постоянный ток, сухой метод

Сухой метод контроля обладает преимуществом перед мокрым при обнаружении подповерхностных дефектов (см. рис. 16.128). Это объясняется тем, что суспензия имеет определенную вязкость и для перемещения ферромагнитной частицы в этой вязкой среде требуется большая сила воздействия магнитного потока, чем для перемещения той же частицы в воздухе.

С увеличением напряженности приложенного поля (до достижения индукции насыщения, см. рис. 16.125) возрастает чувствительность метода.

При контроле магнитными методами лучше всего выявляются плоскостные дефекты: трещины, непровары и несплавления, наибольший размер которых ориентирован под прямым или близким к нему углом относительно направления магнитного потока. Дефекты окружлой формы (поры, шлаковые включения, раковины) не могут создавать достаточного потока рассеяния и, как правило, при контроле обнаруживаются плохо.

Практикой установлено, что МП методом выявляются поверхностные и подповерхностные (на глубине залегания  $\leq 2$  мм) трещины с раскрытием от 0,001 мм, глубиной (высотой дефекта) от 0,05 мм и длиной  $\geq 0,5$  мм.

Могут быть выявлены также относительно крупные дефекты (непровары, поры, шлаковые включения и др.) площадью сечения  $> 2...3 \text{ mm}^2$ , лежащие на глубине 5...6 мм под поверхностью. Плоские дефекты обнаруживаются в случае, если они ориентированы к по-

верхности детали под углом  $>20^\circ$  (максимум чувствительности под углом  $90^\circ$ ). С увеличением глубины залегания дефектов уменьшается скорость скопления магнитного порошка, что затрудняет выявление дефектов и определение их характера.

В значительной мере чувствительность контроля зависит от качества поверхности, на которую наносят суспензию или порошок. Оптимальная шероховатость поверхности деталей, подвергаемых МП контролю, соответствует по параметру  $Ra = 1,625\dots1,25$  мкм. На такой поверхности может быть получена наивысшая чувствительность. Увеличение шероховатости поверхности снижает чувствительность контроля.

Так, обработка поверхности контролируемого изделия по режимам, обеспечивающим выявление тонких дефектов (с раскрытием 0,001 мм), затрудняется из-за появления фона из магнитного порошка. Это ведет к необходимости уменьшения напряженности намагничающего поля и, следовательно, к снижению чувствительности контроля. Шлифованные поверхности (начиная с шероховатости  $Ra = 0,32$  мкм) из-за бликов на поверхности трудно осматривать и разбраковывать, особенно при прямом освещении лампами накаливания. При контроле шлифованных поверхностей осмотр желательно проводить в рассеянном свете или покрывать блестящие поверхности очень тонким, снимающим блики слоем ( $\leq 15$  мкм) краски, например нитроэмалью НЦ-25.

Если на поверхности контролируемого изделия имеются резкие переходы (например, выпуклость валика шва, чешуйчатость, подрезы) или крупные микронеровности, то магнитный порошок интенсивнее скапливается не над дефектами, а в местах переходов и углублений. Поэтому при контроле сварных швов с выпуклостью или грубой чешуйчатостью нельзя однозначно судить о наличии внутренних дефектов. Чтобы избавиться от ложного оседания порошка, уменьшают напряженность намагничающего поля и сварные соединения, выполненные автоматической сваркой, контролируют с чувствительностью не выше уровня Б, а полученные ручной сваркой – уровня В.

**Методика контроля.** Методика МП способа включает в себя следующие операции (ГОСТ 21105-87):

- подготовку поверхностей перед контролем и очистку их от загрязнений, окалины, следов шлака после сварки;

- подготовку суспензии, заключающуюся в интенсивном перемешивании магнитного порошка с транспортирующей жидкостью;
- намагничивание контролируемого изделия;
- нанесение суспензии или порошка на поверхность контролируемого изделия;
- осмотр поверхности изделия и выявление мест, покрытых отложениями порошка;
- размагничивание.

Поверхности изделий, сварных соединений и ОШЗ основного металла шириной, равной ширине шва, но  $\geq 20$  мм с обеих сторон, очищают от грязи, масла, шлаков, окалины и других покрытий, мешающих контролю. Не допускаются резкие западания поверхности, наплывы, натеки, незаполненные кратеры и другие дефекты. Видимые дефекты необходимо устранить до контроля. Шероховатость контролируемой поверхности должна быть не грубее  $Ra = 6,3$  мкм.

На детали с темной поверхностью и большой шероховатостью целесообразно наносить грунтующее покрытие: быстросохнущие лаки и краски, алюминиевую пудру (со связующими добавками) или растворы на основе жидкого стекла (кистью в один-два слоя или распылением). Цвет покрытия должен быть контрастен цвету порошка, тогда не будет затруднен осмотр деталей с целью определения мест скопления порошка. Толщина покрытия не должна превышать 30 мкм.

Контролируемую поверхность перед контролем обезжираивают водными моющими растворами, если контроль проводят с применением водной магнитной суспензии, и просушивают, если контроль выполняют сухим способом. Обычно применяют моющий раствор следующего состава: 4...5 г поверхностно-активного вещества – эмульгатора ОП-7 (ОП-10) и 95...96 мл питьевой воды.

Наносить магнитный порошок на контролируемое изделие можно двумя способами: сухим и мокрым. В первом случае для обнаружения дефектов используют сухой магнитный порошок. Этот способ рекомендуется для контроля деталей с шероховатой поверхностью для обнаружения подповерхностных дефектов. Высокодисперсный сухой порошок (с частицами 0,1...10 мкм) наносят на контролируемую поверхность в виде воздушной смеси, получаемой распылением порошка с помощью портативных устройств – распылителей. При этом следует создавать такие условия, при которых

частицы медленно распределяются по поверхности, не ударяясь о нее.

При мокром способе применяют магнитную суспензию (взвесь магнитного порошка в дисперсионной среде). К дисперсионной среде предъявляют следующие требования: хорошая смачивающая способность; коррозионная стойкость и кинематическая вязкость  $\leq 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре контроля в соответствии с требованиями ГОСТ 21105-87. Магнитные порошки должны обладать определенными магнитными свойствами. Чем выше магнитная проницаемость частиц, тем легче обнаруживать небольшие дефекты. Частицы меньше некоторого определенного размера не осаждаются в применяемой дисперсионной среде. Такой размер частиц является предельным для данной среды. Для МПД обычно используют черный магнитный порошок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

В качестве дисперсионной среды применяют керосин, масло, их смесь (по 50 % керосина и масла) или воду.

При мокром способе магнитную суспензию наносят на контролируемую поверхность поливом слабой струей, не смывающей осевший над дефектом порошок. Магнитная суспензия должна обязательно стекать с поверхности, поэтому последнюю располагают с наклоном. При поливе сосуд, в котором находится суспензия, необходимо постоянно встряхивать, не давая порошку оседать на дно. Поливать контролируемое изделие суспензией следует непосредственно в процессе намагничивания. Осмотр контролируемого изделия проводят во время полива и после него, по окончании намагничивания. Освещенность контролируемой поверхности измеряют с помощью люксметра типа Ю116. Она должна быть  $\geq 500 \text{ лк}$ .

Результаты контроля оценивают по наличию на контролируемой поверхности валика магнитного порошка, видимого невооруженным глазом или с помощью оптических средств, например лупы двух-, четырехкратного увеличения, и воспроизведенного каждый раз при повторном нанесении магнитной суспензии или порошка. Четкий, нерасплывшийся валик свидетельствует о дефекте, выходящем на поверхность, расплывшийся — о наличии подповерхностного дефекта. Длина валика равна протяженности выявленного дефекта с погрешностью, равной ширине валика. Дефект округлой формы с поперечным размером 0,5...1 мм характеризуется линейным осажде-

нием магнитного порошка независимо от направления намагничивающего поля.

Осаждение магнитного порошка не всегда указывает на наличие дефекта. Иногда магнитный порошок скапливается над магнитонеоднородными местами изделия с местным на клепом, структурной неоднородностью и резким изменением площади поперечного сечения. Это явление относят к ложным, или мнимым, дефектам. Осаждение порошка на ложных дефектах, не связанное с нарушением сплошности металла изделия, не является основанием для браковки изделия при магнитном контроле. Чтобы отличить дефекты, выходящие на поверхность, от ложных, можно применять в качестве контрольных капиллярные методы дефектоскопии.

Разбраковку изделий проводят по наличию валиков порошка, соответствующих наличию трещин. При необходимости дефектное место фотографируют или с него снимают дефектограмму. Наиболее простой способ получения дефектограмм — использование бытовой прозрачной липкой ленты. На подсохнувшую поверхность осторожно наносят липкую ленту, плотно прижимают ее к поверхности, затем снимают ленту с прилипшим к ней магнитным порошком и наклеивают на бумагу.

Результаты МП контроля регистрируют в специальных журналах и протоколах, заполняемых по установленной форме.

В процессе контроля необходимо периодически проверять работоспособность применяемого комплекса средств (дефектоскопа, индикаторного материала). Для этой цели обычно служат специальные контрольные образцы с тонкими дефектами, подобранными из числа забракованных деталей. Размеры дефектов в контролируемом образце должны соответствовать принятому уровню чувствительности. Испытательные образцы для контроля сварных соединений могут быть изготовлены по следующей методике.

Из низкоуглеродистой стали (Ст3, сталь 10, сталь 20) изготавливают пластину размером 150 × 150 мм и толщиной 10...15 мм. На одной поверхности пластины (посередине) выфрезеровывают сплошной трапециевидный паз так, чтобы толщина металла под пазом была 2...2,5 мм. Одну половину пластины закрепляют в тисках, а другую сгибают и разгибают по пазу до тех пор, пока на стороне без выфрезерованного паза не появится трещина. Затем во избежание деформации пластины паз заваривают в кон-

дукторе. Вершину паза заваривают электродами диаметром 2 мм при силе тока  $\leq 90$  А, чтобы не допустить полного провара трещин. Выпуклость шва зачищают заподлицо, после чего пластину разрезают поперек шва на две равные части. Плоскость реза полируют и измеряют высоту дефекта. Изменяя режимы сварки и толщину слоя металла над пазом, можно получить трещины желаемой глубины.

К контрольным образцам прилагают паспорт и фотографию поверхности образца с выявленными дефектами. В нем указывают материал образца, размеры и число дефектов, уровень чувствительности, которому соответствуют дефекты. Режим контроля считается стабильным, если число и длина обнаруживаемых на контрольном образце трещин при многократных проверках остаются постоянными.

**Аппаратура.** К основным средствам, используемым при МП дефектоскопии, относят намагничивающие устройства и индикаторные материалы. Контроль осуществляют с помощью универсальных или специализированных дефектоскопов, позволяющих получать необходимые поля и создавать оптимальные условия контроля. В комплект дефектоскопа входят следующие основные устройства:

- намагничивающие, которые обеспечивают циркулярное, полюсное или комбинированное намагничивание;
- для установки деталей на позиции контроля и подвода к ним тока циркулярного намагничивания;
- для обработки деталей индикаторными составами (сuspензией или сухим порошком);
- осветительные (источники видимого или ультрафиолетового излучения);
- измерительные, позволяющие контролировать намагничивающие токи или магнитные поля.

Для МП контроля в основном применяют дефектоскопы трех типов: стационарные универсальные; передвижные и переносные; специализированные (стационарные и передвижные).

Стационарные универсальные дефектоскопы получили широкое распространение на предприятиях крупносерийного (или мелкосерийного) производства разнотипных деталей. Такими дефектоскопами можно контролировать детали различной конфигурации, с производительностью от десятков для многих сотен деталей в час. Скорость контроля значительно возрастает при использовании люминесцентного магнитного способа.

Применяя стационарные универсальные дефектоскопы, можно проводить намагничивание всеми известными способами, а также контроль в приложенном поле и способом остаточной намагниченности.

Такие дефектоскопы отличаются родом намагничивающих токов, мощностью и размерами контролируемых деталей. Длина деталей определяется возможностью раздвижения контактных устройств (бабок), поперечные размеры зависят от мощности дефектоскопа и максимальной силы тока.

В первом приближении можно считать, что максимальный диаметр контролируемой детали таков, что при максимальной силе тока дефектоскопа на поверхности детали напряженность магнитного поля достигает 80 А/м. Это не означает, что в отдельных случаях нельзя контролировать детали большего диаметра, например когда магнитные характеристики материала детали позволяют достичь наивысшей чувствительности контроля при меньшей напряженности намагничивающего поля. Известны десятки типов универсальных стационарных дефектоскопов.

Широкое распространение получили переносные и передвижные (менее мощные) дефектоскопы. Как правило, они представляют собой источники переменного, постоянного (однополупериод выпрямленного) и реже – импульсного тока. Иногда один дефектоскоп позволяет работать с двумя видами тока.

Передвижные и переносные универсальные дефектоскопы предназначены для намагничивания и контроля деталей в условиях, когда невозможно применять стационарные дефектоскопы, например для намагничивания крупногабаритных деталей по частям, в случае работы в полевых условиях и т.п. Как правило, такие дефектоскопы снабжают комплектом для контроля (сухие порошки и устройства для их напыления, сосуды с супензией и т.п.).

Переносные и передвижные универсальные дефектоскопы позволяют проводить: циркулярное намагничивание с помощью токовых контактов, помещаемых на участке детали; продольное намагничивание посредством кабеля, навиваемого на деталь; а иногда электромагнитом.

Получили значительное распространение специализированные полуавтоматы для намагничивания деталей с последующим их контролем способом остаточной намагниченности.

Роликовый импульсный дефектоскоп является электромагнитным прибором, используется при контрольных операциях в цеховых и лабораторных условиях работы. Он предназначен для импульсного намагничивания в открытой магнитной цепи соленоида относительно коротких массивных изделий с малой проницаемостью формы. Прибор обеспечивает одновременное выявление продольных и поперечных дефектов при одноразовом контроле их в ванне с магнитной суспензией.

Из отечественных переносных дефектоскопов лучшими являются приборы МД-4К и МД-6.

#### 16.5.3. МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Сущность этого метода заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и ОШЗ с одновременной записью магнитного поля на магнитную ленту (рис. 16.129, а) и последующем считывании полученной информации с нее специальными воспроизведющими устройствами МГ дефектоскопов, оснащенных вторичными преобразователями в виде феррозондов или индукционных головок. Этот сигнал после преобразования поступает на экран ЭЛТ (см. рис. 16.129, б).

**Методика контроля.** Технология МГ контроля включает в себя следующие операции (ГОСТ 25225-82):

- осмотр и подготовку поверхности контролируемого изделия (при этом с поверхности контролируемых швов должны быть удалены остатки шлака, брызги расплавленного металла, грязь и т.д.);
- наложение на шов отрезка магнитной ленты (перед началом работы магнитная лента

должна быть размагнитена; ее прижимают к шву плоских изделий специальной эластичной «подушкой». При контроле кольцевых швов труб, сосудов и других изделий магнитную ленту к поверхности шва прижимают по всему периметру эластичным резиновым поясом);

– намагничивание контролируемого изделия при оптимальных режимах в зависимости от типа намагничивающего устройства, толщины сварного шва и его магнитных свойств;

– расшифровку результатов контроля, для чего магнитную ленту вводят в считающее устройство дефектоскопа и по сигналам на экранах дефектоскопа выявляют дефекты. Перед воспроизведением дефектоскоп настраивают по эталонной магнитограмме с записью магнитного поля дефекта минимально допустимых размеров. Во время воспроизведения регистрируются все дефекты, амплитуда импульса от которых на экране осциллографа превышает амплитуду импульса от эталонного дефекта.

Применяют МГ метод в основном для контроля стыковых швов, выполненных сваркой плавлением, и в первую очередь при дефектоскопии швов магистральных трубопроводов. Этим методом можно контролировать сварные изделия и конструкции толщиной до 20...25 мм.

**Чувствительность метода.** Чувствительность магнитографического метода контроля  $K$  определяется как отношение вертикального размера (глубины)  $\Delta s$  минимально выявляемого дефекта к толщине  $s$  основного металла контролируемого изделия:  $K = \Delta s / s$ .

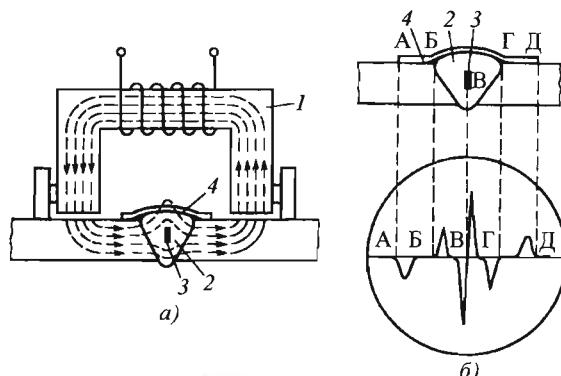


Рис. 16.129. Схема МГ контроля сварного шва:

1 – намагничивающее устройство; 2 – сварной шов; 3 – дефект; 4 – магнитная лента

Критерием выявляемости служит допустимое отношение амплитуды сигнала от дефекта  $A_d$  к амплитуде сигнала от помех  $A_n$ . При уменьшении допустимого отношения  $A_d / A_n$  чувствительность увеличивается, однако достоверность метода снижается. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо оптимизировать этот критерий в зависимости: от вида дефекта, положения его внутри изделия, режима намагничивания и типа применяемой ленты.

Чувствительность МГ контроля определяется: размерами, формой, глубиной и ориентацией дефектов, геометрией поверхности, параметрами считающей головки дефектоскопа и типом магнитной ленты. Магнитографией наилученадежно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары, несплавления), а также протяженные дефекты в виде цепочек шлака, преимущественно ориентированные поперек направления магнитного потока. Значительно хуже фиксируются округлые дефекты (поры, шлаковые включения).

Практикой установлено, что этим методом хорошо обнаруживаются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8...10 % толщины сварного шва. При снятой выпуклости шва максимальная чувствительность контроля к указанным дефектам достигает 5 %. Округлые внутренние дефекты обнаружаются, когда их размер по высоте  $\geq 20$  % толщины изделия. Чувствительность МГ метода к поверхностным дефектам примерно такая же или несколько хуже, чем у МП. Чем глубже расположен дефект от поверхности изделия, на которую укладывается магнитная лента, тем хуже он выявляется. Современная аппаратура позволяет обнаруживать дефекты с вертикальным размером 10...15 % толщины изделия на глубине залегания до 20...25 мм.

На чувствительность МГ метода сильно влияют высота и форма выпуклости шва, а также состояние его поверхности. Для лучшей выявляемости дефектов необходимо выполнять сварку так, чтобы высота выпуклости шва не превышала 25 % толщины основного металла, а переход от наплавленного металла к плоскости был плавным. При этом чешуйчатость на поверхности шва должна составлять  $\leq 25...30$  % высоты выпуклости, но  $\leq 1$  мм. При контроле швов с грубой чешуйчатостью необходима зачистка шва. Не допускается контроль сварных швов со смещением кромок стыкуемых элементов. Наилучшие результаты получают при контроле сварных швов, выполненных автоматической сваркой.

Чувствительность метода можно повысить увеличением чувствительности магнитных лент и улучшением избирательности аппаратуры считывания результатов контроля с магнитной ленты.

При МГ контроле изделия намагничивают с помощью специальных электромагнитов (см. рис. 16.129), реже применяют циркулярное намагничивание. Для обнаружения внутренних дефектов намагничивание проводят постоянным током, а поверхностных и подповерхностных дефектов – переменным.

**Аппаратура.** Результаты контроля с магнитной ленты считывают МГ дефектоскопами. Простейшая структурная схема МГ дефектоскопа изображена на рис. 16.130. Дефектоскоп имеет электродвигатель, приводящий во вращение барабан с несколькими магнитными головками. Последние перемещаются поперек магнитной ленты. Электрические сигналы с головки поступают в усилитель, усиливаются в нем и попадают на ЭЛТ.

Промышленность выпускает дефектоскопы, имеющие два вида индикации: импульсную и телевизионную. При импульсной индикации на экране ЭЛТ возникают импульсы, амплитуда которых характеризует величину дефектов в вертикальном направлении, а при видеондикации магнитный потенциальный рельеф полей рассеяния от дефектов переносится на экран ЭЛТ в виде телевизионного изображения магнитограммы отдельных участков шва.

Известны дефектоскопы типа МД-9 с импульсной индикацией и МД-11 с видимым изображением. Наиболее совершенные дефектоскопы МДУ-2У, МД-10ИМ и МГК-1 имеют двойную индикацию. Из зарубежных дефектоскопов широко применяют приборы типа 9.052 (ФРГ).

В комплект дефектоскопа входит намагничающее устройство, которое состоит из П-образного магнитомягкого сердечника (магнитопровода) и обмотки. Намагничающее

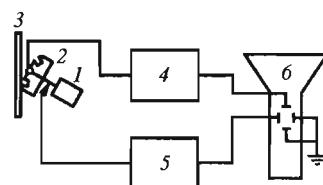


Рис. 16.130. Структурная схема МГ дефектоскопа:

1 – электродвигатель; 2 – блок головок;  
3 – магнитная лента; 4 – усилитель;  
5 – генератор развертки; 6 – ЭЛТ

устройство выполняется с удлиненными полюсами, опирающимися на четыре немагнитных ролика. Опорные ролики создают между поверхностью контролируемого изделия и полюсами намагничивающего устройства воздушный зазор (2...3 мм) постоянной величины, позволяющий электромагниту свободно перемещаться вдоль сварного шва.

Промышленность выпускает несколько типоразмеров передвижных намагничивающих устройств (ПНУ): ПНУ-М1, ПНУ-М2, УНУ, которые предназначены для намагничивания сварных стыков труб диаметром 150...1200 мм и плоских изделий толщиной до 16 мм. Для МГ контроля сварных швов труб большого диаметра (до 1420 мм) и плоских конструкций толщиной до 20 мм применяют шаговые намагничивающие устройства (МНУ-1). Кольцевые швы труб диаметром 57...150 мм намагничают неподвижным намагничивающим устройством типа НВУ-1.

Все перечисленные намагничивающие устройства питаются постоянным током. В заводских условиях источниками тока служат выпрямители, а в полевых часто применяют переносные автономные станции типа СПП-1 или СПА-1.

Для записи магнитных полей при МГ контроле используют магнитную ленту. Лента выполнена на триацетатной или лавсановой основе с нанесением на нее мельчайших ферромагнитных частиц.

#### 16.5.4. ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД

Вихревые (электромагнитные) методы контроля основаны на регистрации изменения поля вихревых токов, наводимых в поверхностном слое изделия. Методами вихревых токов обнаруживаются только поверхностные и подповерхностные (на глубине 1...2 мм) дефекты.

На сопротивляемость поверхностного слоя проникновению вихревых токов влияют, с одной стороны, поля дефектов, на чем основана дефектоскопия изделия, и, с другой, – электрическая проводимость и магнитная проницаемость. Благодаря последнему свойству вихреветоковыми методами измеряют электрическую проводимость бесконтактным способом. Так как электрическая проводимость зависит от химического состава и физико-механических свойств материала, вихреветковые методы успешно применяют в структуроскопии изде-

лий из магнитных и немагнитных материалов. Магнитная проницаемость значительно больше, чем электрическая проводимость, зависит от химического состава, структуры и состояния ферромагнитного материала. В связи с этим контроль изделий из ферромагнитных материалов в большей степени основывается на определении изменения свойств, связанных с магнитной проницаемостью.

По изменению электрической проводимости можно судить о качестве точечной контактной и шовной контактной сварки алюминиевых сплавов. В случае наличия литого ядра электропроводность в зоне последнего для сплавов Д16АМГ уменьшается на 10...15 % по сравнению с электропроводностью основного металла. Для В-95, АМ-6 и других сплавов это изменение может достигать 15...30 %. При наличии дефектов типа «слипание» или непровар электропроводность литого ядра примерно равна электропроводности основного металла.

Вихреветковый метод широко не применяют при контроле сварных швов, так как электропроводность отдельных зон шва и ОШЗ значительно меняется, что создает большие помехи при выявлении дефектов сварки. Вихреветковые методы могут быть использованы для фазового и структурного анализа указанных зон.

**Методика контроля.** Методика контроля включает в себя следующие основные операции (рис. 16.131):

- внешний осмотр изделия и устранение наружных дефектов, мешающих контролю;
- установление полездающей системы 1 на контролируемое изделие 2 и пропускание тока через возбуждающую катушку;
- сканирование датчика 3 и регистрирующих приборов 4, 5 вдоль поверхности контролируемого объекта;
- расшифровку результатов контроля и оценку качества изделия.

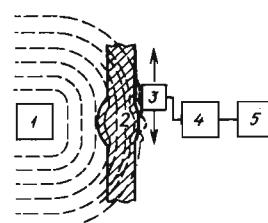


Рис. 16.131. Схема электромагнитного контроля

**Чувствительность метода.** На чувствительность электромагнитного метода значительно влияет зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия, а также их взаимное расположение, форма и размеры. С увеличением зазора резко падает чувствительность метода. Допускаемый максимальный зазор 2 мм. Структурная неоднородность существенно снижает чувствительность метода к обнаружению дефектов. Этим методом удается выявить поверхностные и подповерхностные трещины глубиной 0,1...0,2 мм и протяженностью  $>1$  мм, расположенные на глубине до 1 мм.

Перечисленные геометрические факторы обусловили ряд новых возможностей метода вихревых токов:

- измерение толщины слоя гальванических, лакокрасочных, теплоизоляционных покрытий и пленок;
- определение толщины стенки труб, пустотелых деталей и других тонколистовых изделий при одностороннем доступе к ним;
- измерение диаметра прутков и проволоки.

Однако в ряде случаев геометрические факторы существенно затрудняют практическое применение метода. Последнее объясняется тем, что при контроле деталей, например по свойствам их материалов, связанным с электропроводностью, отклонения в размерах деталей (даже в пределах допусков) могут оказы-

вать более сильное влияние на параметры датчика, чем исследуемые свойства материала деталей.

**Способы контроля.** Электромагнитные методы подразделяются в основном по полездающим системам. Эти системы могут быть проходными, если катушка с током охватывает деталь или вставляется в нее (рис. 16.132, а, б), и накладными, когда катушку с током устанавливают на деталь торцом (см. рис. 16.132, в).

В первом случае электромагнитная волна от полездающей системы распространяется в направлении контролируемого объекта, во втором – вдоль его поверхности. Измерительные катушки (датчики) могут быть выполнены отдельно от полездающих (генераторных) и обычно располагаются вблизи поверхности контролируемого изделия (рис. 16.133).

Накладные преобразователи выполняют с ферромагнитным сердечником или без него. Ферромагнитный сердечник (обычно ферритовый) повышает абсолютную чувствительность преобразователя и уменьшает зону контроля благодаря локализации потока.

Проходные вихревоковые преобразователи (ВТП) подразделяют на наружные и внутренние. Такая классификация проходных преобразователей основана на том, что они в процессе контроля проходят или снаружи объекта, охватывая его, или внутри объекта.

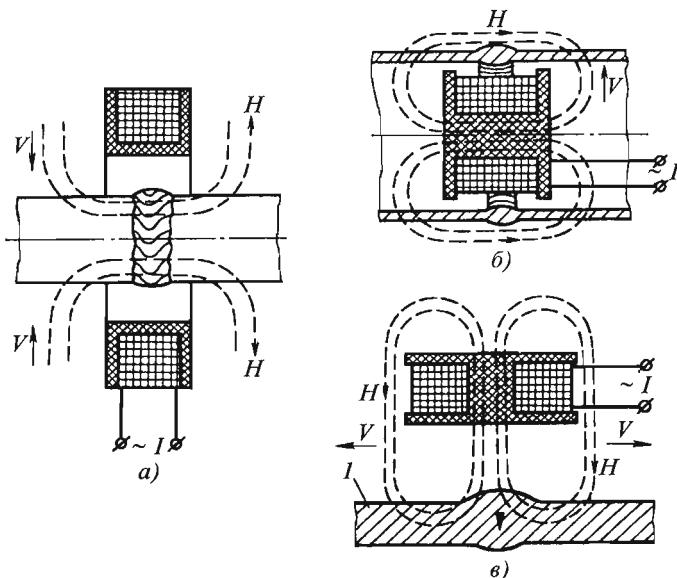


Рис. 16.132. Основные схемы полездающих систем электромагнитного контроля:  
H – вектор напряженности магнитного поля; V – направление электромагнитной волны

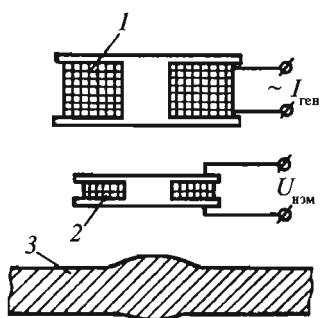


Рис. 16.133. Схема регистрации параметров электромагнитного поля:

- 1 – полезадающая (генераторная) катушка;
- 2 – измерительная катушка;
- 3 – контролируемое изделие

Накладные ВТП применяют в основном при контроле качества объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить локальность и высокую чувствительность.

Наружные проходные ВТП используют при контроле линейно-протяженных объектов (проволоки, прутка, трубы и т.д.), а также при массовом контроле мелких изделий. Внутренними проходными ВТП контролируют внутренние поверхности трубы, а также стенки отверстий в различных деталях.

**Дефектоскопы с проходными преобразователями.** При автоматизированном, высокоскоростном и бесконтактном контроле качества эффективны дефектоскопы с проходными преобразователями, позволяющими проверять в широком диапазоне типоразмеров протяженные объекты (трубы, прутки, проволоку с поперечными размерами 0,15...135 мм) и мелкие детали (шарики и ролики подшипников, метизы и т.д.). При этом производительность контроля может достигать 50 м/с (для проволоки) или нескольких тысяч мелких деталей в час. Производительность контроля труб, прутков ограничивается инерционностью устройств транспортирования и разбраковки и редко  $> 3$  м/с.

Основной параметр дефектоскопа – порог чувствительности – определяется минимальными размерами дефекта заданной формы, при которых отношение сигнал/помеха равно 2. Порог чувствительности устанавливают по образцу с искусственными дефектами различной формы, например в виде отверстий разного диаметра и глубины в трубах и прутках, в форме продольных рисок на проволоке и т.д. Реальный порог чувствительности зависит от

уровня помех, связанных с вариацией параметров объекта, например, шероховатости поверхности и др. Порог чувствительности дефектоскопа с проходными преобразователями обычно определяется глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженной в процентах от поперечного размера (диаметра детали).

Дефектоскопы отличаются главным образом конструкцией, наличием блоков: сортировки; представления и регистрации информации; маркировки дефектных участков; подмагничивания и т.д.

Дефектоскоп типа ИПП предназначен для выявления в условиях поточного производства поверхностных дефектов в прутках круглого и шестиугольного профилей диаметром 4...47 мм, выполненных из ферромагнитных и неферромагнитных металлов и сплавов. Глубина порогового дефекта 1...2 % диаметра, но  $\geq 0,1$  мм; длина 2 мм.

Прибор типа ИДП рассчитан на обнаружение в прутках диаметром 1...5 мм из неферромагнитных и ферромагнитных металлов и сплавов поверхностных дефектов: трещин, волосин, раковин и т.п. Глубина порогового дефекта 0,05 мм.

Ферромагнитные сварные трубы диаметром до 60 мм контролируют дефектоскопом ЭЗТМ. Проходной преобразователь, выполненный в виде трехвитковой трансформаторной системы, обеспечивает надежную работу устройства в условиях высоких температур при наличии окалины, масел. Дефектоскоп обнаруживает непровары в сварном шве и служит надежной основой для замены гидроиспытаний.

**Дефектоскопы с накладными преобразователями.** Для контроля линейно-протяженных объектов круглого сечения (прутки, трубы) применяют сканирующие дефектоскопы с вращающимися вокруг объекта накладными преобразователями. Такие дефектоскопы предназначены для выявления поверхностных дефектов в изделиях из ферромагнитных и слабомагнитных сталей, а также из цветных металлов и сплавов.

Для контроля плоских деталей типа листов, а также изделий, имеющих малую кривизну поверхности, разработан ряд переносных малогабаритных дефектоскопов с преобразователями, вращающимися в плоскости, параллельной поверхности объекта. Наиболее признан дефектоскоп типа ЭДМ-65. Он выявляет поверхностные дефекты в защищенных сварных швах деталей из алюминиевых сплавов.

Сканирующие дефектоскопы, имеющие сравнительно большой диаметр головки, трудно применять для контроля изделий сложной конфигурации. В этих случаях обычно используют переносные и малогабаритные дефектоскопы с малым диаметром преобразователя, работающего в статическом режиме.

В настоящее время в России выпускаются приборы типов ВД-89НМ, ВД-96 и др., которые по техническим характеристикам не уступают зарубежным аналогам.

## 16.6. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

**Общие сведения.** Капиллярные методы неразрушающего контроля основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Капиллярный неразрушающий контроль предназначен для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхности и сквозных дефектов в объектах контроля; определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности. Этот вид контроля позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твердых неферромагнитных материалов.

Капиллярный контроль применяют также для объектов, выполненных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности МП методом или если его нельзя применять по условиям эксплуатации объекта.

Капилляр, выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны, называют поверхностью несплошностью, а соединяющий противоположные стенки объекта контроля – сквозной. Если поверхностная и сквозная несплошности являются дефектами, то допускается применять вместо них термины «поверхностный дефект» и «сквозной дефект».

Изображение, образованное пенетрантом в месте расположения несплошности и подобное форме сечения у выхода на поверхность объекта контроля, называют индикаторным

рисунком (след). Применительно к несплошности типа единичной трещины вместо термина «индикаторный рисунок» допускается термин «индикаторный след».

Глубина несплошности – размер несплошности в направлении внутрь объекта контроля от его поверхности. Длина несплошности – продольный размер несплошности на поверхности объекта. Раскрытие несплошности – поперечный размер несплошности у ее выхода на поверхность объекта контроля.

Необходимым условием выявления капиллярным контролем дефектов нарушения сплошности материала типа полостных, имеющих выход на поверхность объекта и глубину распространения, значительно превышающую ширину их раскрытия, является относительная их незагрязненность посторонними веществами.

**Капиллярные методы** контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на:

- метод проникающих растворов – жидкостный метод, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора;
- метод фильтрующихся супензий – жидкостный метод, базирующийся на применении в роли жидкого проникающего вещества индикаторной супензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперской фазы.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на:

- люминесцентный, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;
- цветной, состоящий в регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;
- люминесцентно-цветной, заключающийся в регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом ультрафиолетовом излучении;
- яркостный, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля.

### 16.6.1. ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Капиллярный дефектоскопический материал (КДМ) применяют при капиллярном неразрушающем контроле и используют для пропитки, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности и проявления его остатка с целью получения первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля.

Дефектоскопические материалы выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к объекту контроля, его состояния и условий контроля. Их укомплектовывают в целевые наборы, в которые входят полностью или частично взаимоусловленные совместимые дефектоскопические материалы, рассматриваемые ниже.

*Набор дефектоскопических материалов – взаимозависимое сочетание дефектоскопических материалов: индикаторного пенетранта, проявителя, очистителя и гасителя.*

*Индикаторный пенетрант* (пенетрант) – КДМ, способный проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их.

*Очиститель от пенетранта* (очиститель) – КДМ, предназначенный для удаления индикаторного пенетранта с поверхности объекта контроля самостоятельно или в сочетании с органическим растворителем или водой.

*Гаситель пенетранта* (гаситель) – КДМ, служащий для гашения люминесценции или цвета остатков соответствующих индикаторных пенетрантов на поверхности объекта контроля.

*Проявитель пенетранта* (проявитель) – КДМ, предназначенный для извлечения индикаторного пенетранта из капиллярной полости несплошности с целью образования четкого индикаторного рисунка и создания контрастирующего с ним фона.

**Наборы материалов для капиллярной дефектоскопии.** КДМ позволяет обнаружить микроскопические поверхностные дефекты на изделиях практически из любых конструкционных материалов. Разнообразие дефектоскопируемых изделий и различные требования к их надежности требуют дефектоскопических средств различной чувствительности. Сейчас имеется значительный ассортимент материалов, применяемых при капиллярном неразрушающем контроле и предназначенных для пропитки, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности и проявления его остатков с целью получения

первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля. Они широко используются предприятиями различных отраслей промышленности.

Эффективность КДМ определяется материалами: пенетрантом, проявителем и очистителем или гасителем.

### 16.6.2. АППАРАТУРА КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Аппаратура капиллярного неразрушающего контроля (КНК) – это технические средства контроля, исключая дефектоскопические материалы, используемые для капиллярного неразрушающего контроля.

Капиллярный дефектоскоп – это совокупность приборов КНК, вспомогательных средств и образцов для испытаний, которыми с помощью набора дефектоскопических материалов осуществляют технологический процесс контроля. Капиллярные дефектоскопы (далее – дефектоскопы) предназначены для выявления невидимых или слабовидимых глазом поверхностных дефектов (трещин, пористости, непроваров, других несплошностей различного происхождения) в металлических и неметаллических материалах, полуфабрикатах и изделиях любой геометрической формы.

Приборы КНК – это устройства, с помощью которых получают, передают и преобразуют информацию о технологических операциях, дефектоскопических материалах или наличии несплошности для непосредственного восприятия оператором или средством, его заменяющим.

В качестве вспомогательных средств КНК используют: ванны, камеры, столы, контейнеры, кисти, распылители и т.п., которые служат для выполнения или интенсификации одной или нескольких технологических операций КНК без изменения и регулирования их параметров.

**Общие технические требования к дефектоскопам.** Дефектоскопы бывают переносные, передвижные, стационарные.

Рабочий режим дефектоскопа выбирают: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

В зависимости от функционального назначения и эксплуатационной законченности дефектоскопы могут включать в себя полностью или частично отличающиеся функциональные устройства, рассматриваемые ниже.

Устройство подготовки объектов к КНК предназначено для очистки контролируемой поверхности и полостей несплошностей объекта контроля перед применением пенетранта.

Устройство обработки объектов дефектоскопическими материалами служит для отдельного или взаимозависимого заполнения полостей несплошностей пенетрантом, удаления пенетранта, нанесения и удаления проявителя.

Устройство проявителя несплошностей как средство контроля рассчитано на интенсификацию процесса образования индикаторного рисунка под воздействием тепла, вакуума, вибрации или упругой деформации объекта контроля.

Устройство выявления несплошностей предназначено для визуального обнаружения или косвенной регистрации индикаторного рисунка в нормированных условиях освещения или облучения.

Устройство контроля дефектоскопического материала контролирует один или несколько параметров дефектоскопического материала на их соответствие установленным нормам.

Устройство контроля излучения – прибор для измерения облученности или освещенности поверхности объекта контроля соответствующим излучением.

Устройство контроля технологического процесса контролирует режим технологической операции (операций), подготовки и обработки объекта контроля дефектоскопическим материалом.

Для оценки класса чувствительности применяют натурный образец объекта контроля (или его часть) с естественными дефектами. Допускается применение образцов для испытаний с искусственными дефектами, рекомендуемые способы создания которых приведены ниже.

Образец для испытаний средств КНК – это изделие с заранее нормируемыми при определенных условиях свойствами, предназначенное для поверки прибора, вспомогательного средства, технологического процесса или дефектоскопического материала КНК. В качестве нормируемых свойств могут быть: наличие несплошностей определенного раскрытия, глубины, протяженности, белизна проявляющего покрытия и т.п.

**Методика контроля.** Основными операциями КНК являются:

- подготовка объекта к контролю;
- обработка объекта дефектоскопическими материалами;
- проявление дефектов;
- обнаружение дефектов и расшифровка результатов контроля;
- окончательная очистка объекта.

Технологический режим операций контроля (продолжительность, температуру, давление) устанавливают в зависимости от: используемого набора дефектоскопических материалов, особенностей объекта контроля и типа искомых дефектов, условий контроля, используемой аппаратуры.

Подготовка объектов к контролю включает в себя: очистку контролируемой поверхности от всевозможных загрязнений; удаление лакокрасочных покрытий, моющих составов и дефектоскопических материалов, оставшихся от предыдущего контроля; сушку объекта контроля.

Для предварительной очистки поверхностей применяют механическую очистку объекта контроля струей песка, дроби, косточковой крошки, другими диспергированными абразивными материалами или резанием, в том числе обработку поверхности шлифованием, полированием, шабровкой.

Для окончательной очистки контролируемых объектов используют следующие виды очистки:

- в парах органических растворителей;
- растворяющую воздействием на объект контроля удаляющих загрязнения водяных или органических растворителей, в том числе посредством струйной промывки, погружения, протирки;
- химическую водными растворами химических реагентов, взаимодействующих с удаляемыми загрязнениями, не повреждая объект контроля;
- электрохимическую водными растворами химических реагентов с одновременным воздействием электрического тока;
- УЗ органическими растворителями, водой или водными растворами химических соединений в УЗ поле с использованием режима УЗ капиллярного эффекта – явления аномального увеличения высоты и скорости подъема жидкости в капиллярной полости под действием УЗ;
- анодно-ультразвуковую водными растворами химических реагентов с одновременным воздействием УЗ и электрического тока;

- тепловую прогревом при температуре, не вызывающей недопустимых изменений материала объекта контроля;
- сорбционную смесью сорбента и быстросохнущего органического растворителя, наносимой на очищаемую поверхность, выдерживающей и удаляемой после высыхания.

Необходимые способы очистки, их сочетание и требуемую чистоту контролируемых поверхностей определяют в технической документации на контроль. При высоком классе чувствительности контроля предпочтительны не механические, а химические и электрохимические способы очистки, в том числе с воздействием на объект контроля УЗ или электрического тока. Эффективность этих способов обусловлена оптимальным выбором очищающих составов, режимов очистки, сочетанием и последовательностью используемых способов очистки, включая сушку.

При подготовке объекта к контролю в необходимых случаях снимают или компенсируют остаточные или рабочие напряжения в объекте, сжимающие полости искомых дефектов.

При поиске сквозных дефектов в стенках трубопроводных систем, баллонов, агрегатов и аналогичных полостных объектов, заполненных газом или жидкостью и находящихся под избыточным давлением, полости таких объектов освобождают от жидкости и доводят давление газа в них до атмосферного.

Этап обработки объекта дефектоскопическими материалами заключается в заполнении полостей несплошностей индикаторным пенетрантом, удалении его избытка и нанесении проявителя.

Известно несколько способов заполнения полостей несплошностей индикаторным пенетрантом:

- капиллярный самопроизвольный, когда индикаторный пенетрант наносится на контролируемую поверхность смачиванием, погружением, струйно, распылением с помощью сжатого воздуха, фреона или инертного газа;
- вакуумный – при давлении в их полостях менее атмосферного;
- компрессорный – при воздействии на него избыточного давления;
- УЗ в УЗ поле с использованием УЗ капиллярного эффекта;
- деформационный – при воздействии на объект контроля упругих колебаний звуковой частоты или статического нагружения, увеличивающего раскрытие несплошности.

Для выявления сквозных дефектов пенетрант допускается наносить на поверхность, противоположную контролируемой. Температура контролируемого объекта и индикаторного пенетранта, а также продолжительность заполнения полостей дефектов должны быть в пределах, указанных в технической документации на данные дефектоскопический материал и объект контроля.

Избыток индикаторного пенетранта удаляют или гасят на контролируемой поверхности одним из следующих способов:

- протиркой салфетками с применением в необходимых случаях очищающего состава или растворителя;
- промыванием водой, специальным очищающим составом или их смесями; погружением, струйно или распылением;
- обдуванием струей песка, дроби, косточковой крошки, древесных опилок или другого абразивного очищающего материала;
- воздействием на пенетрант гасителем люминесценции или цвета.

При использовании водосмываемых (после воздействия очистителя) индикаторных пенетрантов перед употреблением проявителей любого типа (кроме суспензий на водяной основе) мокрую контролируемую поверхность подвергают естественной сушке или сушке в потоке воздуха. Допускается протирка чистой гигроскопической тканью, ветошью, древесными опилками и т.п. В отдельных случаях разрешается удалять индикаторный пенетрант обдувкой и гашением без предварительной обработки очистителем и водой.

Проявитель наносят следующими способами:

- распылением жидкого проявителя струей воздуха, инертного газа или безвоздушным методом;
- электрораспылением проявителя в электрическом поле струей воздуха или механическим путем;
- созданием воздушной взвеси порошкообразного проявителя в камере, где размещен объект контроля;
- нанесением жидкого проявителя кистью, щеткой или заменяющими их средствами;
- погружением объекта контроля в жидкий проявитель;
- обливанием жидким проявителем;
- электроосаждением проявителя путем погружения в него объекта контроля с одновременным воздействием электрического тока;

– посыпанием порошкообразного проявителя, припудриванием или обсыпанием объекта контроля;

– наклеиванием ленты пленочного проявителя прижатием липкого слоя к объекту контроля.

При использовании самопроявляющихся, фильтрующихся и других подобных индикаторных пенетрантов проявитель не наносят.

Проявление следов дефектов представляется собой процесс образования рисунка в местах дефектов, для чего используют один из способов проявления индикаторных следов:

– выдержку объекта контроля на воздухе до момента появления индикаторного рисунка;

– нормированный по продолжительности и температуре нагрев объекта контроля при нормальном атмосферном давлении;

– выдержку в нормированном вакууме над поверхностью объекта контроля;

– упругодеформационное воздействие на объект посредством вибрации, циклического или повторного статического его нагружения.

Обнаружение дефектов представляет собой сочетание или отдельное использование способов наблюдения и регистрации индикаторного следа.

**Чувствительность** КНК называют его качество, характеризуемое порогом, классом и дифференциальной чувствительностью средства контроля в отдельности, либо целесообразным их сочетанием. **Порог чувствительности** КНК – раскрытие несплошности типа единичной трещины определенной длины, выявляемое с заданной вероятностью по заданному геометрическому или оптическому параметру следа. Верхнему порогу чувствительности соответствует наименьшее выявляемое раскрытие, а нижнему – наибольшее.

**Геометрический параметр индикаторного рисунка** – отношение среднего значения ширины индикаторного следа к раскрытию обнаруженной несплошности.

**Оптический параметр индикаторного рисунка** – отношение среднего значения яркости индикаторного следа к среднему значению яркости фона.

**Фон поверхности** – бездефектная поверхность объекта контроля, обработанная дефектоскопическими материалами. **Дифференциальная чувствительность** средства КНК – отношение изменения оптического и (или) геометрического параметров ин-

дикаторного следа к вызывающему его изменению раскрытия при неизменных глубине и длине несплошности типа единичной трещины.

Класс чувствительности КНК – диапазон значений преимущественного раскрытия несплошности типа единичной трещины определенной длины при заданных условиях вероятности выявления, геометрическом и (или) оптическом параметрах следа.

Класс чувствительности капиллярного контроля определяют в зависимости от минимальной ширины раскрытия дефектов, мм.

I .....	<1
II .....	1...10
III .....	10...100
IV .....	100...500
Технологический .....	Не нормируют

Достигаемую чувствительность в необходимых случаях определяют на натурных объектах или искусственных образцах с естественными или имитируемыми дефектами, размеры которых уточняют металлографическими или другими методами анализа. Конструкция и технология изготовления образцов для испытаний рассмотрены выше.

Требуемый класс чувствительности, объем, периодичность и нормы оценки качества устанавливают разработчик объекта контроля.

## 16.7. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

В общем случае нарушение герметичности определяется наличием в оболочке сквозных течей или проницаемостью основного материала с нарушенной структурой.

**Течь** – это канал или пористый участок изделия или его элементов, нарушающих их герметичность. Как правило, малые характеристические размеры течей исключают возможность их визуального наблюдения или обнаружения всеми другими методами дефектоскопии, кроме методов проникающих веществ. Малые размеры сечений и неоднородность их по длине произвольно извилистых каналов не позволяют характеризовать течи геометрическими размерами. Поэтому величину течей принято определять потоками проникающих через них веществ. Соответственно, в величине потоков выражается порог чувствительности аппаратуры и методов, так же как и диапазон выявленных течей.

Поскольку количество перетекающего через течь вещества зависит от его свойств, температуры и перепада давлений на канале течи, то для однозначности принято характеризовать количество течь потоком воздуха, проходящего через нее из атмосферы в вакуум при температуре  $\sim 18^{\circ}\text{C}$ . Обозначают величину течи буквой *B*.

Требования к порогу чувствительности испытаний изделий устанавливают исходя из требований к их герметичности. Абсолютная герметичность недостижима и неконтролируема. Герметичными принято считать конструкции, если перетекание через них проникающих веществ достаточно мало для того, чтобы его влиянием можно было пренебречь в условиях эксплуатации и хранения.

Методы течеискания существенно различаются как по чувствительности и избирательности реакции на пробное вещество, так и по принципу обнаружения пробного вещества, проникающего через течи.

**Аппаратура.** Наибольшей чувствительностью обладают промышленные масс-спектрометрические течеискатели, реагирующие только на пробное вещество вне зависимости от присутствия посторонних паров и газов.

**Масс-спектрометрические течеискатели** основаны на принципе ионизации газов и паров с последующим разделением образовавшихся ионов по отношениям их массы к заряду в магнитных и электрических полях. Этот метод наиболее универсален и чувствителен. Существуют масс-спектрометрические течеискатели, рассчитанные на работу с различными пробными веществами, но в большинстве случаев предпочтение отдается гелию.

Промышленные масс-спектрометрические течеискатели предназначены для работы с гелием. Наличие собственной откачной системы позволяет калибровать их по потокам. Течеискатель отличается наличием насоса, обеспечивающего режим избирательного накопления гелия.

Основным элементом, определяющим тип и возможности масс-спектрометра, служит его ионооптическая система – анализатор. Ионный источник и анализирующее устройство большей частью аналогичны у всех масс-спектрометров, применяемых для газового анализатора и течеискателя. Существенно отличаться эти масс-спектрометры могут по типу анализатора. В гелиевых масс-спектрометрических течеискателях, как правило, применяется

магнитный анализатор со 180-градусной фокусировкой.

**Галогенные течеискатели** построены на основе накаленной платины ионизировать на своей поверхности атомы щелочных металлов, обладающие низким потенциалом ионизации, и резко увеличивать эмиссию регистрируемых течеискателей положительных ионов в присутствии галогенов.

Чувствительный элемент моделей галогенных течеискателей представляет собой диод, состоящий из спирального платинового анода, навитого на керамическую трубку, и коаксиального с ним охватывающего платинового коллектора. Прямым накалом анод разогревается до  $800\ldots 900^{\circ}\text{C}$ . С нагреваемого при этом керамического основания анода испаряются входящие в его состав щелочные металлы. До начала испытаний фиксируется фоновый ионный ток. Возрастание ионного тока в ходе испытаний свидетельствует о поступлении к чувствительному элементу галогенсодержащих веществ, проникающих через течи.

Благодаря способности платины противостоять окислению описанный чувствительный элемент способен работать как в условиях вакуума, так и в атмосфере. Соответственно, галогенный течеискатель снабжают преобразователями двух типов: вакуумным и атмосферным. Течеискатель с автономным питанием, размещаемый в ранце и рассчитанный на применение в полевых условиях, имеет только атмосферный преобразователь.

Течеискатель с вакуумным преобразователем применяют для проверки герметичности вакуумных систем с относительно низкими требованиями к их герметичности, течеискатель с атмосферным преобразователем – для контроля газонаполненных систем и изделий, содержащих галогены в рабочем заполнении или допускающих опрессовку галогенсодержащими проникающими веществами. Основными пробными веществами служат фреоны-12 и -22.

**Электронозахватные течеискатели** различных типов существенно отличаются по принципу действия, но объединены в единый класс приборов, способных фиксировать появление электроотрицательных пробных веществ: элемента газа, фреонов, кислорода и других по образуемым ими отрицательным ионам.

Так, например, вакуумные испытания на герметичность могут быть проведены с помощью вакуумметра течеискателя, магнитный

электроразрядный преобразователь которого помимо обычного для таких преобразователей коллектора положительных ионов, содержит коллектор отрицательных ионов. Возрастание тока этого коллектора свидетельствует о проникновении в вакуум электроотрицательного пробного вещества. С наибольшей чувствительностью фокусируется элегаз (шестифтористая сера  $SF_6$ ). Порог чувствительности лежит в диапазоне  $10^{-8}...10^{-9}$  Па.

Для регистрации утечек электроотрицательных пробных веществ в атмосферу, в частности утечек элегаза, может быть применен течеискатель, названный плазменным и реагирующий на пробные вещества изменением частоты срыва высокочастотного генератора. Через стеклянную трубку-натекатель, находящуюся в поле плоского конденсатора, с помощью механического вакуумного насоса прокачивается с определенной скоростью воздух, отбираемый от испытуемой поверхности, так что в трубке поддерживается давление  $10...30$  Па. Высокочастотный генератор ионизирует воздух внутри трубы. Возникает тлеющий разряд, демпфирующий контур и срывающий высокочастотную генерацию. Происходит рекомбинация ионов, повышающая добротность контура. Генератор вновь возбуждается, и процесс повторяется с определенной частотой.

**Инфракрасные приборы**, основанные на поглощении инфракрасных лучей, получили широкое применение в различных отраслях промышленности для определения концентрации оксида углерода ( $CO$ ), диоксида углерода ( $CO_2$ ), амиака ( $NH_3$ ) и других газов. Это объясняется тем, что в инфракрасной области спектра газы имеют весьма интенсивные и разные по положению в спектре полосы поглощения. Инфракрасные лучи поглощают все газы, молекулы которых состоят не менее чем из двух различных атомов. Этим определяется широкий круг пробных веществ, которые можно использовать в процессе контроля герметичности изделий (закись азота, пары фреона, амиак и др.).

**Манометрические устройства** контроля герметичности в основе своей используют метод регистрации изменения давления в изделии или в испытательной камере. Этот метод, будучи одним из самых простых и часто применяемых на практике, продолжает совершенствоваться и в настоящее время. В последние годы в связи с развитием техники контроля малых изменений давления и температуры

возможности метода расширяются. На практике обычно контролируют величину падения (повышения) давления за определенное время. Величину допустимого изменения давления газовой среды в объекте устанавливают на основе критериев герметичности, которые должны быть рассчитаны для определенной группы оборудования.

Метод контроля по изменению давления находит применение главным образом при предварительных испытаниях объектов на предмет выявления сравнительно крупных сквозных дефектов. Самостоятельно этот метод применяется при контроле герметичности изделий, когда требования к порогу чувствительности  $\leq 1 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot Pa/s$ . При контроле герметичности мелких изделий может быть достигнут порог чувствительности  $5 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot Pa/s$ .

**Акустические средства течеискания** занимают особое место среди течеискателей других типов, поскольку они просты и надежны в эксплуатации, не требуют каких-либо сложных специальных приспособлений, не нарушают основных технологических процессов, безопасны для здоровья обслуживающего персонала.

Существует несколько групп акустических приборов, каждая из которых соответствует определенному методу течеискания.

1. Это УЗ расходомеры двух типов. Первый тип – расходомеры с проходными измерительными секциями. Расход определяется, как правило, по разности времен прохождения УЗ импульсом наклонного сечения трубопровода по направлению потока жидкости и против него. Конструкция канала расходомера показана на рис. 16.134. Проходные УЗ расходомеры обладают малым гидросопротивлением, легко монтируются в технологических трубопроводах.

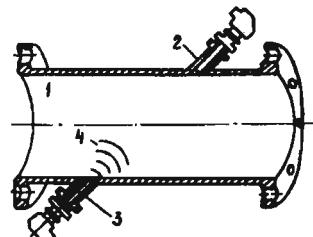


Рис. 16.134. Конструкция канала расходомера:  
1 – канал с установочными фланцами;  
2 и 3 – приемно-передающие реверсируемые преобразователи; 4 – УЗ волна

Второй тип – так называемые бесконтактные УЗ расходомеры, в которых преобразователи не контактируют с протекающей в трубе жидкостью. Преобразователи устанавливают на наружную поверхность трубы, что позволяет оперативно проводить измерения без каких-либо вмешательств в технологический процесс. Для измерения расхода чистых жидкостей (содержание твердых частиц и пузырьков газа не должно превышать 2 %) используют приборы, реализующие обычный времязимпульсный метод, а для загрязненных жидкостей следует применять доплеровские расходомеры. Основной недостаток бесконтактных расходомеров – невысокая точность (2...3 %).

2. Акустические корреляционные приборы. Схема применения корреляционного течеискателя приведена на рис. 16.135.

Датчики 1 устанавливают на концах контролируемого участка непосредственно на трубу 2 или на детали запорной арматуры. Они принимают акустические сигналы, возникающие в металле в результате истечения жидкости или газа 4 из трубы. Усиленные сигналы передаются по кабелю или радиоканалу в блок обработки, где вычисляется их взаимная корреляционная функция. Положение пика ее соответствует положению места 3 утечки.

Достоинство корреляционных течеискателей заключается в том, что они обеспечивают контроль протяженных участков трубопроводов и результаты практически не зависят от наличия внешних акустических шумов.

3. Акустические течеискатели, работающие по методу непосредственного прослушивания шума утечки с поверхности земли. Перемещаясь вдоль трубы, оператор определяет место утечки по характерному шуму или максимуму сигнала (рис. 16.136).

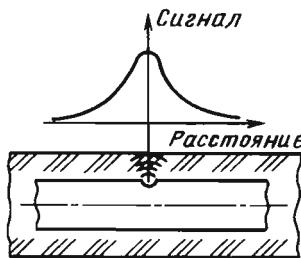


Рис. 16.136. Зависимость амплитуды акустического сигнала от места расположения дефекта

Максимальная глубина обнаружения утечки зависит от давления в трубе, характера повреждения, типа почвы и других условий и на практике достигает 4...5 м. Для работы на теплотрассах подобные течеискатели оснащают термоканалом, который обеспечивает измерение температуры в точке установки геомикрофона.

Основное преимущество течеискателей данной группы заключается в том, что они обнаруживают места повреждения трубы с высокой точностью без вскрытия грунта. Однако ввиду большой трудоемкости процесса контроля с их помощью невозможно оперативно обследовать протяженный отрезок трубопровода. Поэтому, как правило, приборы второй и третьей групп променяют в совокупности: сначала с помощью коррелятора определяют отрезок трубы с предполагаемым местом повреждения, а затем с поверхности грунта локализуют дефект.

4. Течеискатели, обеспечивающие контроль герметичности запорной арматуры и мест соединения. Контроль запорной арматуры осуществляется контактно по уровню шума, создаваемого при просачивании жидкости или газа через запорное устройство. Герметичность соединений определяется бесконтактно по тому же принципу.

Приборы этой группы используют для контроля любой запорной арматуры, сосудов и резервуаров, имеющих внутреннее давление, отличное от наружного, а также для контроля газозаполненных кабелей связи.

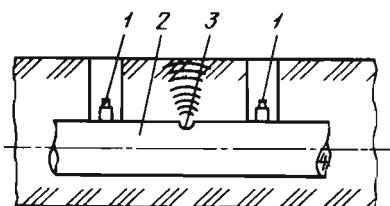


Рис. 16.135. Схема применения корреляционного течеискателя

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. М.: Высш. шк., 1986. 288 с.

2. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. М.: Высш. шк., 1991. 432 с.
3. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: Краткий справочник. М.: Изд-во «ООО НПЦ НК "Эхо+"», 2000. 89 с.
4. Ермолов И.Н. Контроль ультразвуком: Краткий справочник. М.: НПО «ЦНИИИТмаш», 1992. 86 с.
5. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справочное издание / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
6. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: Уч. пособие. СПб.: Радиовидение, 1995. 336 с.
7. Методы акустического контроля металлов / Под ред. Н.П. Алешина. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
9. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С.В. Румянцев и др. М.: Машиностроение, 1976. 336 с.
10. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. 326 с.
11. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. Т. 4. М.: Машиностроение, 1979. 512 с.
12. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 496 с.

# Г л а в а 17

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 17.1. КОНЦЕНТРАЦИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Концентрация сварочного производства (КСП) представляет собой процесс сосредоточения на крупных заводах (центросварах), в комплексе цехов или пролетов изготовления конструктивно и технологически сходных сварных изделий и входящих в них элементов (заготовок, деталей и узлов). Этот процесс сопровождается ростом доли крупных заводов в общем выпуске сварных конструкций отраслью машиностроения.

При КСП должны быть созданы предпосылки для максимального использования достижений научно-технического прогресса и прежде всего современной высокопроизводительной техники, прогрессивной технологии, передовых методов организации труда и производства, обеспечивающих сокращение затрат овеществленного и живого труда, рост его производительности, снижение себестоимости и улучшение качества сварных конструкций, а также повышение рентабельности сварочного производства.

Наиболее эффективна интенсивная форма КСП, когда размеры производства сварных конструкций наращивается не за счет увеличения числа единиц оборудования и расширения производственных площадей (экстенсивная форма концентрации), а благодаря повышению удельной мощности заготовительных, металлообрабатывающих и сборочно-сварочных машин и агрегатов.

Для машиностроения и других отраслей пока еще характерна экстенсивная форма КСП. Так, на многих машиностроительных предприятиях созданы цехи, пролеты, участки, удовлетворяющие в основном нужды собственного производства в сварных конструкциях. Это явилось одной из причин увеличения числа единиц сварочного оборудования и расширения производственных площадей.

Формы концентрации сварочного производства зависят от ряда технических и органи-

зационно-экономических факторов. Их анализ и обобщение передового опыта позволили установить практически возможные формы КСП, а именно сосредоточение:

- всех стадий производства сварных конструкций, предназначенных для одной или нескольких подотраслей машиностроения (краностроения, вагоностроения, котлостроения или же тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения в целом), на крупных заводах – центросварах;
- процессов сборки и сварки конструкции на заводе, входящем в состав крупного объединения;
- на специализированных заводах изготовления стандартных и унифицированных сварных элементов и конструкций, потребляемых в машиностроении;
- производства отдельных заказов, небольших или значительных серий разнотипных или конструктивно и технологически сходных сварных конструкций в крупных цехах (включающих в себя пролеты и участки с различным уровнем их специализации) и на заводах с большим объемом выпуска продукции, состоящей из сварных деталей и узлов;
- выпуска одинаковых (однотипных) сварных конструкций и их элементов в специализированных цехах заводов крупносерийного и массового производства.

Оценку и анализ уровня концентрации сварочного производства целесообразно осуществлять по следующим показателям:

- доле объема сварных конструкций (заготовок, деталей и узлов), изготавливаемых крупными заводами (цехами), в общем объеме выпуска этих конструкций подотраслями машиностроения, выраженного в натуральных (штуках, комплектах, тоннах) и стоимостных измерителях;
- доле численности работающих (рабочих) на крупных заводах (в цехах) в общей численности работающих (рабочих), занятых изготовлением сварных конструкций в подотрасли;

- доле среднегодовой производственной мощности крупных заводов или цехов в общей (суммарной) среднегодовой производственной мощности заводов (цехов) подотрасли, выпускающих сварные конструкции;
- доле стоимости основных производственных фондов крупных заводов (цехов) в общей стоимости основных производственных фондов заводов (цехов) подотрасли, изготавливающих сварные конструкции.

Преимущества крупных сварочных производств обусловили тенденцию постоянного увеличения числа больших заводов и цехов для изготовления сварных конструкций. Однако следует отметить, что чрезмерное укрупнение заводов и цехов для этих целей не всегда экономически оправдано, так как при этом удлиняются сроки строительства крупных объектов и снижается в связи с этим экономическая эффективность капитальных затрат; возникают трудности в равномерном размещении сварочных производств в стране; затрудняется приближение заводов к поставщикам исходных материалов и заводам – потребителям сварных конструкций; возрастают объем и дальность перевозок; увеличиваются транспортные расходы и т.д. Эти недостатки особенно ощущимы при необоснованно высоком уровне концентрации производства крупногабаритных сварных конструкций.

Машиностроение характеризуется рациональным сочетанием крупных, средних и небольших сварочных производств. При определении оптимального уровня концентрации сварочного производства учитывают, что основная часть сварных конструкций является элементами выпускаемых заводами машин и оборудования, причем доля их в общей массе конструктивных элементов машин во многих случаях невелика. В связи с этим даже при крупносерийном и массовом производстве машин экономически выгодными могут оказаться небольшие и средние сварочные производства. Обычно они целесообразны при концентрации технологически сходных сварных конструкций в объеме, позволяющем наиболее полно использовать мощности машин и оборудования.

Оптимальный размер сварочного производства устанавливают расчетом и сравнительным анализом комплекса технико-экономических показателей, характеризующих:

- минимально и максимально допустимую загрузку оборудования на всех стадиях изготовления сварных конструкций;

– максимально допустимый и минимально возможный производственный цикл изготовления сварных конструкций и их элементов;

– минимально допустимую и максимально возможную производительность оборудования ведущих звеньев производства сварных конструкций (в массовом производстве – поточных линий, в серийном и единичном – дорогостоящего уникального или универсального оборудования), а также его суммарную загрузку, которая при двухсменной работе должна быть  $\geq 85\%$ .

Минимальный размер сварочных производств определяют по единичной мощности машин и оборудования, обеспечивающих изготовление сварных конструкций с высокими экономическими показателями (не ниже среднеотраслевых), максимальный лимитируется допустимой величиной транспортных расходов на доставку исходных материалов и заготовок для изготовления сварных конструкций и последних (в готовом виде) – заводам-потребителям. Если транспортные расходы полностью поглощают экономию эксплуатационных затрат, достигнутых в результате КСП, то дальнейшее укрупнение заводов (сварочных цехов) нецелесообразно.

Оптимальный размер сварочных производств определяют, применяя математические методы и ЭВМ. Задача формулируется следующим образом: при заданной годовой потребности в сварных конструкциях (в экономическом районе, отрасли) найти такой вариант объемов специализированных производств и пунктов их размещения, при котором обеспечивается минимум приведенных затрат. В качестве экономико-математической модели для решения этой задачи принимают типовую модель оперативного планирования. Решение задачи сводится к минимизации функционала

$$\sum_{i=1}^m f_i(X_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = X_i ; \quad \sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j ; \quad \sum_{i=1}^m X_i = \sum_{j=1}^n b_j ;$$

$$X_{ij} \geq 0 , \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

$$\prod_{h=0}^{r_i} (X_i - a_i^h) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $m$  – число возможных пунктов производства;  $n$  – число пунктов потребления;  $i$  – индекс пункта производства;  $j$  – индекс пункта потребления;  $f_i(X_i)$  – затраты на производство продукции в  $i$ -м пункте в объеме  $X_i$ , ед.;  $f_i(X_i) = [C(X_i) + E_h K_y(X_i)] X_i$  [здесь  $C(X_i)$  – себестоимость 1 т сварных конструкций в зависимости от объема производства;  $K_y(X_i)$  – удельные капитальные вложения на 1 т сварных конструкций в зависимости от объема выпуска];  $C_{ij}$  – стоимость перевозки 1 т сварных конструкций от  $i$ -го поставщика к  $j$ -му потребителю;  $X_{ij}$  – объем перевозок из  $i$ -го пункта производства  $j$ -му потребителю;  $a_i^h$  – набор возможных объектов производства в  $i$ -м пункте ( $h = 0, 1, \dots, r_i$ );  $E_h = 0,15$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Для решения задачи необходимо располагать следующими данными: объемом перспективной потребности отрасли или экономического района в сварных конструкциях, зависимостью себестоимости 1 т сварных конструкций от объема их производства, удельных капитальных вложений и от производственной мощности предприятия. Кроме того, следует рассчитать транспортные затраты на перевозку сварных конструкций от поставщика к потребителю, используя статистические данные о стоимости перевозок транспортом различного вида. Практика показала, что транспортные расходы, связанные с доставкой сварных конструкций из пункта производства в пункт потребления в пределах производственного объединения, составляют сравнительно небольшую величину. В результате анализа данных устанавливают степень влияния производственных затрат и транспортных расходов на уровень КСП.

## 17.2. СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специализация сварочного производства – это процесс разделения труда, характеризующийся сосредоточением производства однотипных сварных конструкций, их отдельных деталей (узлов) или определенных технологических процессов (операций) в пределах подотрасли, объединения, предприятия (цеха, пролета, участка). При специализации создаются предпосылки для эффективного использования новой техники и технологии, расширения об-

ласти применения высокомеханизированного труда, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и т.д. Специализация сварочного производства положительно влияет на все стороны производственной деятельности предприятия. Ее следует рассматривать как часть общей проблемы специализации машиностроения.

Процесс создания специализированных сварочных производств осуществляется по следующим трем направлениям:

- выделению или созданию новых подотраслей, объединений и предприятий, выпускающих определенные виды машин из сварных элементов (этот форму специализации называют *предметной*);

- превращению производства отдельных сварных деталей (узлов) изделия в самостоятельные, обособленные производства – центросвары (этот форму специализации имеют *подетальной*);

- превращение отдельных стадий производства (технологических процессов, операций) в самостоятельное производство (сварнолитых, сварно-кованных и других заготовок). Этой форме специализации называют *технологической (стадийной специализацией)*.

Одной из причин недостаточного темпа специализации производства сварных конструкций является его разобщенность. Подавляющая часть сварочных цехов входит в состав специализированных по отраслевому признаку машиностроительных заводов. Обособление сварочного производства внутри этих заводов обусловливается особенностями технологических процессов изготовления сварных конструкций. В итоге вопросы специализации сварочного производства решаются главным образом во внутриотраслевом разрезе.

Предметная специализация идет по пути концентрации выпуска машин и отдельных их частей из сварных элементов для определенных подотраслей: вагоно-, дизеле-, крано-, котлостроения и т.д. Она способствует созданию наиболее совершенных видов техники на основе использования достижений науки и передового опыта; принятию качественно новых инженерных решений. Недостаток этой формы специализации состоит в том, что не во всех случаях обеспечивается требуемая технологическая однородность производства. Она возможна при ограниченной номенклатуре типов машин, закрепляемых за предприятием, объединением.

Подетальная специализация развивается на основе концентрации выпуска отдельных деталей (узлов), предназначенных для комплектования машин и оборудования на стадии их окончательной сборки и монтажа. Она осуществляется созданием специализированных заводов (в пределах объединения), цехов, пролетов и участков (цехи или пролеты сварных рам вагонов, каркасов котлов, пролетных балок кранов, кабин автомобилей и т.д.).

Технологическая специализация заключается в концентрации операций одной из стадий процесса производства деталей с выделением заводов (в пределах объединения), цехов, пролетов и участков по производству литьих, кованых, штампованных, либо- и штампосварных заготовок для различных сварных конструкций. Первичным звеном внутризаводской специализации является рабочее место, имеющее обычно технологическую форму специализации.

Практика показала, что для внутризаводской специализации сварочного производства немалое значение имеет дифференцирование сварочных цехов по конструктивно-технологической сложности изготавляемых ими конструкций. Таким путем можно более правильно оценивать уровень специализации сварочного производства и выявлять резервы ее развития. Например, у цехов емкостных сварных конструкций из листового проката больше предпосылок для организации специализированных пролетов, участков и поточных линий, чем у цехов сварных цилиндрических конструкций из литых и кованых элементов.

Важными условиями повышения уровня специализации сварочного производства являются:

- сокращение номенклатуры сварных конструкций на основе широкой унификации и повышения конструктивно-технологического сходства (подобия) входящих в них элементов;
- создание отраслевых и межотраслевых специализированных заводов, производящих трудоемкие большой массы сварные узлы крупногабаритных сложных изделий;
- открытие заводов (цехов) по производству стандартных общемашиностроительных и унифицированных сварных конструкций, а также типовых для определенной совокупности сварных изделий, входящих в классификационные подразделения;
- создание межотраслевых центросваров по производству сложных ответственных

сварных конструкций, на которых по сравнению с отраслевыми центросварами возможны рост производительности труда в 2 раза и снижение себестоимости 1 т сварных конструкций в 2–3 раза;

- углубление внутризаводской специализации путем концентрации однотипных, конструктивно и технологически сходных заготовок, деталей и узлов сварных конструкций в комплексно-механизированных и автоматизированных пролетах, на участках и поточных линиях.

Создание этих условий связано с преодолением многих технических и организационных трудностей. Значительная часть их может быть устранена на основе классификации сварных конструкций по конструктивно-технологическим признакам, типизации технологических процессов, четкого планирования кооперированных поставок и т.д.

Уровень развития отраслевой, заводской и внутризаводской специализации сварочного производства оценивается с помощью следующих показателей:

- доли сварных конструкций, изготавливаемых машиностроительной отраслью, в общем объеме выпуска сварных конструкций по стране

$$K_{m,c} = 100N_m / N_0,$$

где  $N_m$ ,  $N_0$  – объем выпуска сварных конструкций, производимых отраслью машиностроения и по стране в целом, р./т (в оптовых ценах);

- доли сварных конструкций, выпускаемых специализированными машиностроительными заводами, в общем объеме сварных конструкций, производимых машиностроительной отраслью,

$$K_{z,c} = 100N_{c,m} / N_{o,m},$$

где  $N_{c,m}$ ,  $N_{o,m}$  – объем выпуска сварных конструкций, изготавливаемых специализированными машиностроительными заводами, центросварами и по машиностроению в целом;

- доли сварных конструкций, изготавливаемых специализированными цехами, пролетами и участками завода, в общем объеме выпуска сварных конструкций, производимых заводом,

$$K_{v,c} = 100N_{u,c} / N_{o,z},$$

где  $N_{u,c}$ ,  $N_{o,z}$  – объем выпуска сварных конструкций, изготавливаемых специализированными сварочными цехами, и общий объем сварных конструкций, производимых заводом.

Качественными показателями уровня внутризаводской (внутрицеховой) специализации могут быть:

- коэффициент унификации сварочного производства

$$K_{y.c} = 100 N_{y.c} / N_{o.c} = 100 (N_{c.c} + N_{k.t}) / N_{o.c},$$

где  $N_{y.c}$ ,  $N_{o.c}$  – число наименований (типоразмеров) унифицированных сварных конструкций и общее число наименований сварных конструкций по программе специализированного сварочного цеха (пролета, участка);  $N_{c.c}$  – то же, стандартных сварных конструкций (их элементов);  $N_{k.t}$  – то же, конструктивно-технологически сходных и однотипных сварных конструкций (их элементов);

- коэффициент технологической однородности сварочного производства

$$K_{t.c} = 100 N_{t.t} / (N_{t.t} + N_{n.t}),$$

где  $N_{t.t}$  – число наименований (типоразмеров) сварных конструкций, изготавляемых по типовым (групповым) технологическим процессам;  $N_{n.t}$  – то же, выпускаемых по различным (специфичным для каждого из них) технологическим процессам;  $N_{t.t} + N_{n.t}$  – общее число наименований (типоразмеров) сварных конструкций, составляющих плановое задание специализированного сварочного цеха (пролета, участка);

$$K'_{t.c} = 100 \sum_{i=1}^m N_{t_i} \sum_{j=1}^f t_{mj} / Q_{r.p},$$

где  $m$  – число конструктивно и технологически сходных (однотипных) комплектов или групп сварных конструкций (узлов, деталей) в годовом плане специализированного сварочного цеха, изготавляемых по типовой (групповой) технологии;  $N_{t_i}$  – число конструктивно и технологически сходных сварных конструкций (узлов, деталей), входящих в  $i$ -й комплект (группу);  $f$  – число единиц оборудования, с помощью которого изготавливается  $i$ -й комплект;  $t_{mj}$  – норма времени на обработку (сборку, сварку)  $i$ -го комплекта на  $j$ -м рабочем месте (операции);  $Q_{r.p}$  – трудоемкость сварных конструкций специализированного цеха (пролета, участка) по годовому плану;

- коэффициент специализации рабочих мест

$$K_{c.p} = 100 C_{n.o} / C_{o.p},$$

где  $C_{n.o}$  – число рабочих мест цеха (пролета, участка) с различным числом постоянно закрепленных за ними периодически повторяющихся операций изготовления сварных конструкций (узлов, деталей);  $C_{o.p}$  – общее число рабочих мест сварочного цеха (пролета, участка).

Выполнение на рабочих местах постоянно закрепленных за ними одной-двух деталеопераций свидетельствует о высоком уровне специализации цеха (пролета, участка), характерном, как правило, для крупносерийного и массового производства сварных конструкций.

Закрепление за рабочими местами пяти – восьми периодически повторяющихся деталеопераций говорит о более низком уровне специализации цеха (пролета, участка), достигнутом на основе изготовления конструктивно и технологически сходных деталей и узлов сварных конструкций при серийном их производстве.

Отсутствие постоянного закрепления деталеопераций за рабочими местами исключает специализацию цехов (пролетов, участков), что характерно для единичного мелкосерийного производства сварных конструкций;

- коэффициент специализации оборудования сварочного цеха (пролета, участка)

$$K_{c.o} = 100 F_{c.p} / (F_{c.p} + F_{n.p}) = 100 F_{c.p} / F_{o.b},$$

где  $F_{c.p}$  – время занятости оборудования (отдельных единиц или групп оборудования одинакового назначения) изготовлением сварных конструкций (деталей, узлов), соответствующих профилю цеха (пролета, участка), машиночасы;  $F_{n.p}$  – время занятости оборудования изготовлением сварных конструкций, узлов, деталей и заготовок, не отвечающих профилю цеха (пролета, участка), машиночасы;  $F_{o.b}$  – годовой плановый фонд времени работы единицы (группы) оборудования, машиночасы; максимальная величина  $K_{c.o}$ , равная 100 %, характерна для массового производства сварных конструкций;

- коэффициент конструктивной и технологической специализации оборудования сварочного цеха (пролета, участка)

$$K_{k.o} = 100 F_{o.k} / F_{o.b} = 100 F_{o.t} / F_{o.b},$$

где  $F_{o.k}$  – время занятости оборудования изготовлением заготовок (деталей, узлов) для сварных конструкций, размеры которых соответствуют техническим и эксплуатационным возможностям заготовительного (металлообраба-

тывающего, сборочно-сварочного) оборудования, например время занятости 4 ед. оборудования отвечает вырезке заготовок из листа только определенной толщины: до 6; 6...12; 12...24 и >24 мм; при  $F_{o,k} = 100\%$  достигается наиболее полное использование мощности каждой из 4 ед. оборудования;  $F_{o,t}$  – время работы оборудования на оптимальных режимах, соответствующих типовой технологии, установленной для определенной совокупности (комплекта) конструктивно и технологически сходных элементов сварных конструкций; при  $F_{o,t} = 100\%$  достигается наиболее полная производительность оборудования.

Приведенные показатели позволяют не только комплексно оценивать достигнутый уровень специализации сварочного производства на данный момент, но и судить об основных направлениях, путях и предпосылках дальнейшего развития и совершенствования всех ее форм.

Экономическая эффективность специализации сварочного производства достигается в результате благоприятного влияния ее на многие стороны производственно-хозяйственной деятельности завода-центросвара, предприятий и цехов. Прежде всего стремятся к наиболее полному использованию мощностей машин и оборудования, производственных площадей, материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов. Резко улучшается качество сварных конструкций, снижается их себестоимость, растет производительность труда благодаря применению прогрессивного оборудования, технологии и оснастки, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Существенно повышается эффективность капитальных вложений, ускоряется оборачиваемость оборотных средств, возрастают прибыль и рентабельность сварочного производства.

### 17.3. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ СВАРОЧНЫХ ЦЕХОВ

Производственная мощность сварочного цеха – это максимально возможный годовой выпуск сварных конструкций при полном использовании наличного парка оборудования и производственных площадей, применении передовых технологических процессов, прогрессивных технических норм, научной организации труда и производства, внедрении передового опыта и мобилизации имеющихся резер-

вов производства. Различают проектную, плановую, достигнутую и среднегодовую производственные мощности.

Проектная производственная мощность – заранее заданный выпуск сварных конструкций проектируемому цеху из расчета минимально необходимых для него средств производства и рабочей силы, методов организации производства и прогрессивных технических норм.

Плановая производственная мощность – выпуск сварных конструкций, устанавливаемый сварочному цеху на определенный период (дату) с учетом не только имеющихся в его распоряжении средств производства и достигнутых прогрессивных нормативов, но и того прироста мощностей, который должен быть получен в результате выполнения намеченных организационно-технических мероприятий.

Достигнутая производственная мощность – это мощность сварочного цеха на определенную дату текущего периода, обусловленная имеющимися на эту дату средствами производства, применяемыми прогрессивными нормами трудоемкости, достигнутой производительностью оборудования и т.д.

Показатель среднегодовой мощности используют для установления сварочным цехам годовой производственной программы, а также для сравнительного анализа годового выпуска продукции и уровня использования производственных мощностей

$$M_{ср.год} = M_{вход} + M_{ср.год.пр} - M_{ср.год.выб},$$

где  $M_{вход}$  – входная мощность;  $M_{ср.год.выб}$  – среднегодовое выбытие мощности.

Среднегодовой прирост мощности

$$M_{ср.год.пр} = \frac{M_{в1}F_1 + M_{в2}F_2 + \dots + M_{в,n}F_n}{12},$$

где  $M_{в1}, M_{в2}, \dots, M_{в,n}$  – мощности сварочного цеха, введенные на определенную дату планируемого года;  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – периоды времени с момента введения мощностей до конца текущего года, мес.

Коэффициент использования производственной мощности

$$k_{исп.м} = \frac{N_{фак.вып}}{N_{ср.год}},$$

где  $N_{фак.вып}$  и  $N_{ср.год}$  – фактический и среднегодовой выпуск сварных конструкций соответственно.

Производственная мощность сварочного цеха может быть определена по мощности ведущих групп оборудования или ведущего участка:

$$M_{в.о} = \frac{F_{\text{фак}} c}{t_{\text{п.н}}},$$

где  $F_{\text{фак}}$  – фактический (эффективный) фонд времени работы единицы оборудования на определенный планируемый период;  $c$  – число единиц оборудования, входящего в указанную группу;  $t_{\text{п.н}}$  – прогрессивная норма трудоемкости изготовления единицы (тонны) сварных конструкций.

При изготовлении сварочным цехом сварных конструкций нескольких наименований мощность группы оборудования

$$M_{в.о} = \frac{F_{\text{фак}} c}{t_{\text{ усл}}},$$

где  $t_{\text{ усл}}$  – условная (или средневзвешенная) трудоемкость единицы сварной конструкции.

Производственная мощность по площади ведущего участка, предназначенного для изготовления сварных конструкций широкой номенклатуры,

$$M_{yч} = \frac{F_{\text{фак}} F_{\text{пл}}}{\sum_1^m f_i T_{u_i} N_i},$$

где  $F_{\text{пл}}$  – производственная площадь участка,  $\text{м}^2$ ;  $f_i$  – площадь, необходимая для изготовления сварной конструкции  $i$ -го наименования соответствующей массы (в тоннах),  $\text{м}^2$ ;  $T_{u_i}$  – длительность производственного цикла изготовления сварной конструкции  $i$ -го наименования, ч;  $N_i$  – число изготавливаемых сварных конструкций  $i$ -го наименования.

В заводской практике производственную мощность сварочного цеха (участка, пролета) нередко рассчитывают укрупненным методом исходя из объема производства сварных конструкций (в тоннах), достигнутого в отчетном периоде:

$$M_{\text{отч}} = N_{\text{дост}} F_{\text{пл}} F_n,$$

где  $N_{\text{дост}}$  – достигнутый часовой выпуск сварных конструкций с  $1 \text{ м}^2$  производственной площади в отчетном периоде, т;  $F_n$  – рассмат-

риваемый период работы цеха (месяц, квартал);  $F_{\text{пл}}$  – производственная площадь цеха, фактически используемая при производстве сварных конструкций,  $\text{м}^2$ .

Ориентировочно объем производства сварных конструкций в планируемом периоде

$$M_{\text{пл}} = \frac{N_{\text{дост}} t_{\text{отч}}}{t_{\text{п}} \gamma \alpha},$$

более точно

$$M_{\text{пл}} = \frac{N_{\text{дост}} t_{\text{отч}} k_{\text{упл}} k_{\text{пот}}}{t_{\text{п}} \gamma \alpha} F_{\text{пл}},$$

где  $k_{\text{упл}}$  – коэффициент возможного уплотнения производственных площадей цеха (участка, пролета) производственными рабочими;  $k_{\text{пот}}$  – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени в отчетном периоде  $t_{\text{отч}}$  (по данным сварочных цехов);  $t_{\text{п}}$  – запланированная трудоемкость 1 т сварных конструкций, нормочасы;  $\gamma$  – коэффициент увеличения  $t_{\text{п}}$  за счет дополнительных затрат времени, возникающих в процессе производства из-за изменений в номенклатуре изготавляемых сварных конструкций, их конструктивных и технологических различий, неточностей в определении трудоемкости и т.д.;  $\alpha$  – коэффициент снижения трудоемкости в планируемом периоде в результате внедрения организационно-технических мероприятий. Коэффициент возможного уплотнения производственных площадей

$$k_{\text{упл}} = \frac{k_{\text{раб.пл}} F_{\text{пл.отч}}}{k_{\text{раб.отч}} F_{\text{пл.пл}}},$$

где  $k_{\text{раб.пл}}$ ,  $k_{\text{раб.отч}}$  – число основных производственных рабочих соответственно в планируемом и отчетном периодах;  $F_{\text{пл.отч}}$ ,  $F_{\text{пл.пл}}$  – площади, занятые в производстве сварных конструкций в отчетном и планируемом периодах.

Коэффициенты увеличения и снижения трудоемкости равны:

$$\gamma = \frac{t_{\text{п}} t_{\text{доп}}}{t_{\text{п}}}; \quad \alpha = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{сниж}}}{t_{\text{п}}},$$

где  $t_{\text{доп}}$  – дополнительные затраты времени в единичном и мелкосерийном производстве;  $t_{\text{сниж}}$  – экономия времени, достигаемая в результате внедрения организационно-технических мероприятий.

Величины  $t_{\text{доп}}$  и  $t_{\text{сниж}}$  определяют по заводским данным с учетом особенностей сварочного производства.

Прирост прибыли от досрочного освоения проектных мощностей

$$\Pi_{\text{п.м}} = (C_{\text{пр}} - C_{\phi}) \frac{M_r k_{\text{д.у}}}{T_{\phi}} (T_{\text{n}} - T_{\phi}),$$

где  $C_{\text{пр}}$ ,  $C_{\phi}$  – соответственно проектная и фактическая себестоимость единицы сварной конструкции;  $M_r$  – годовая проектная мощность заготовительного, обрабатывающего и сборочно-сварочного оборудования (участка, пролета, поточной линии);  $k_{\text{д.у}}$  – коэффициент, учитывающий достигнутый уровень производства сварных конструкций;  $T_{\text{n}}$ ,  $T_{\phi}$  – соответственно нормативный и фактический сроки освоения проектной мощности.

При необходимости дополнительных капитальных вложений в период освоения мощностей  $K_d$  возможная годовая экономия

$$\mathcal{E}_b = \Pi_{\text{п.м}} - E_n K_d.$$

Премия работникам за освоение проектной мощности устанавливается в процентах к месячному фонду заработной платы (по тарифным ставкам к должностным окладам).

## 17.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ (ПР) В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

### 17.4.1. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ПР

Работотехника, ее развитие и эффективное использование – важные перспективы качественного улучшения механизации и автоматизации основных и вспомогательных операций процесса изготовления сварных конструкций. Имеются в виду создание и внедрение принципиально новых видов техники – ПР, представляющих собой сложную систему (единство конструкции, энергии и информации), «думающую» исполнительную машину.

Возможны следующие варианты конструкции ПР:

- машина с техническими и эксплуатационными параметрами, существенно превосходящими параметры механических рук;
- машина-автомат (автоматический манипулятор с программным управлением), способная автоматически выполнять комплекс действий, предусмотренных программой, ана-

логичных действиям человека при выполнении им основных и вспомогательных операций;

- автономно функционирующая многоцелевая машина-автомат, предназначенная для выполнения двигательных и умственных функций человека (без непосредственного участия его) и обладающая способностью самообучения, самоорганизации и приспособления к внешней среде (перспективы развития ПР).

Особый интерес представляет такая принципиальная особенность многих ПР, как эксплуатационная универсальность их – возможность выполнения различных операций с быстрой перенастройкой программы работ. Это позволяет использовать ПР в качестве универсальных звеньев, связывающих отдельные машины и оборудование в единую комплексно-механизированную и автоматизированную производственную систему, отличающуюся значительной технологической и организационной гибкостью. Исключительно велика роль роботов, предназначаемых для выполнения трудоемких, тяжелых и вредных для здоровья человека операций, а также для работ, осуществляемых в экстремальных и агрессивных средах, сложных производственных условиях. В связи с этим особое значение приобретают:

- четкое планирование потребности и установление рациональных темпов наращивания выпуска ПР с учетом перспектив их технического совершенствования и развития, а также технологических машин и оборудования сварочного производства;
- повышение серийности выпуска универсальных ПР на основе конструктивно-технологической унификации, способствующей упрощению и удешевлению их производства и эксплуатации;
- разработка рациональных параметрических рядов и типажа ПР;
- оптимизация технических требований к ним и выполняемых ими функций;
- переход к агрегатным конструкциям ПР, когда на основе базовой конструкции с использованием минимального количества унифицированных элементов создаются различные модификации роботов;
- централизация и специализация производства ПР, являющиеся основой снижения их стоимости и оптово-отпускных цен;
- разработка упрощенных моделей роботов и механических рук для выполнения несложных операций;

- постоянное обновление информации о новых образцах ПР, их конструктивно-технологическом совершенствовании и эксплуатационных преимуществах;
  - повышение надежности, точности и быстродействия ПР;
  - оптимизация моделей ПР в зависимости от числа степеней подвижности, объема памяти (числа точек), точности позиционирования, скорости перемещения рабочего органа, стоимости его и технологического оборудования, затрат на обслуживание и эксплуатацию их;
  - сокращение затрат времени и средств на цикл работ, выполняемых ПР;
  - улучшение ухода, текущего обслуживания и ремонта ПР, повышение ответственности работников за эффективное их использование;
  - расширение использования ПР на сложных технологических операциях для максимальной загрузки установленного на них дорогостоящего оборудования;
  - систематизация видов работ в зависимости от возможности выполнения их ПР с той или иной системой управления;
  - создание различного типа систем программного управления из унифицированных блоков;
  - использование универсальных компактных и быстросъемных исполнительных органов и схватов, расширяющих эксплуатационные возможности ПР;
  - разработка более качественной сенсорной аппаратуры и алгоритмов обработки первичной информации (для ПР второго и третьего поколений);
  - достижение синхронности и логической согласованности выполнения взаимосвязанных функций технологическим оборудованием и ПР, позволяющими избежать значительных потерь времени, обусловленных несогласованностью их действий;
  - модульный (блочный) принцип конструирования ПР, когда ПР и систему управления выполняют в виде отдельных модулей, из которых комплектуют с минимальными затратами времени и средств различные роботизированные системы для автоматизированных производственных процессов;
  - установление степени влияния вида программирования робота, способа его обучения, типов системы управления и привода на его производительность;
  - разработка рациональных планировок расположения технологического оборудования и ПР;
  - создание новых типовых производственных структур сварочных цехов с учетом широкого использования ПР;
  - установление влияния роботизации сварочного производства на квалификационную структуру кадров, производительность и оплату труда рабочих;
  - разработка организационно-экономических основ построения роботизированного производства сварных конструкций.
- Для совершенствования технических параметров и принятия экономически целесообразных инженерных решений на этапах разработки, изготовления и эксплуатации ПР большое значение имеет их классификация.

#### 17.4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПР

Отличительная особенность классификации ПР состоит в научно обоснованном выборе признаков и выделении соответствующих им классификационных подразделений. Рассмотрим их.

1. Характер выполняемых ПР функций. По этому признаку различают роботы, непосредственно участвующие в технологическом процессе, и роботы, предназначаемые для выполнения транспортно-складских, погрузочно-разгрузочных и других вспомогательных операций.

2. Объем и разнообразие работ, которые могут ими осуществляться. По этому признаку ПР подразделяются на универсальные, специализированные и специальные.

Универсальные ПР обладают широкими технологическими возможностями, что предопределяет их количественное превосходство над специальными и специализированными. Специальные роботы рассчитаны на работу (подъем, перемещение, опускание и т.д.) с одинаковыми деталями или выполнение определенной технологической операции, а специализированные – на работу с конструктивно-технологически сходными деталями или выполнение однотипных технологических операций (процессов).

3. Метод управления, по которому различают роботы с ручным, копирующим и кнопочным управлением.

4. Грузоподъемность. В зависимости от нее роботы бывают сверхлегкие – на 0,1...1,0 кг;

легкие – на 1,6...10 кг; средние – на 16...100 кг; тяжелые – на 160...1000 кг и сверхтяжелые (>1000 кг).

5. Класс точности позиционирования или воспроизведения траектории, согласно которому выделяют роботы с относительной погрешностью позиционирования или воспроизведения траектории, в %: до 0,01; >0,01 до 0,05; >0,05 до 0,1 и >0,1.

6. Степень их технического совершенства. По этому признаку различают роботы первого, второго и третьего поколений.

Роботы первого поколения (с программным управлением) применяют для: обслуживания станков, прессов, печей, сварочных установок и машин; выполнения основных технологических процессов (гибки, вальцовки, резки, сборки, сварки); погрузочно-разгрузочных и складских работ. Роботы второго поколения отличаются от роботов первого наличием чувствительных устройств (осаждение, телевизионное зрение), имеют более сложное управляющее устройство. Роботы третьего поколения (интегральные роботы) в отличие от роботов второго поколения обрабатывают информацию, получаемую от органов чувств. Эти роботы применяют для работ, требующих распознавания образов (работа по чертежу), а также протекающих в сложных и изменяющихся условиях.

По типу информационной системы их подразделяют на роботы: с поисковой системой; отражением усилий; искусственным зрением; комбинированной информационной системой. Применяют эти роботы для: сборки и монтажа по монтажной схеме; выполнения работ, требующих информации о внешнем виде и свойствах предметов (трещины, загрязненность, цвет и т.д.); работ с неориентированными деталями произвольной формы.

В зависимости от назначения ПР признаками классификации могут быть тип привода рабочих органов, тип системы управления, число манипуляторов (два – четыре и более), степень гибкости программы (уровень адаптации), тип рабочей зоны, способ задания режима работы, тип информационной системы, тип исполнения, быстродействие и т.д.

Всего в применяемых классификациях ПР используют до 20 признаков, а максимальное число признаков в одной классификации ~9 – 12. Практика показала, что такое число признаков классификации ПР сравнительно полно и достоверно характеризует их техниче-

ские и эксплуатационные особенности. Поэтому недостатки существующих классификаций ПР кроются не в количественном составе признаков, а в отсутствие единой научно обоснованной системы выбора признаков, последовательности и порядка включения их в классификацию, формирования соответствующих им классификационных подразделений (классов, подклассов, групп и других подразделений ПР), установления характера и форм связи между техническими параметрами и организационно-экономическими показателями представителей классификационных подразделений.

Отсутствие такой системы привело к тому, что почти все применяемые классификации сводятся к обычному группированию ПР по некоторому числу признаков без выделения по ним классификационных подразделений и без систематизации и анализа технических параметров и экономических показателей типовых прогрессивных ПР. Подобное группирование ПР ограничивает возможности классификации и снижает важную роль ее в совершенствовании производства сварных конструкций.

На современном этапе развития сварочной робототехники система классификации ПР должна удовлетворять следующим требованиям:

- она должна при минимальном числе признаков комплексно и наиболее полно характеризовать конструктивно-технологические, эксплуатационные особенности ПР и экономические показатели, достигаемые при их применении;

- признаки классификации ПР должны отражать не только достигнутые результаты, но и перспективы развития роботов. К таким признакам может быть отнесен тип системы управления робота, показывающий, с одной стороны, уровень конструктивного совершенства (автоматизация) и эксплуатационные возможности их в различных производственных условиях, а с другой, – перспективы развития роботов по рассматриваемому направлению; они состоят, например, в создании высокоразвитых адаптивных систем для контактной и дуговой сварки; систем управления производственными комплексами, включая основное технологическое оборудование и ПР первого поколения; в разработке алгоритма адаптивного группового управления роботами второго поколения;

- характеристика классификационных подразделений, выделенных по первому признаку классификации, должна включать в себя

типовые операции (процессы), на которых применение роботов наиболее эффективно;

- в перечень классификационных подразделений по второму признаку классификации должны входить прогрессивные виды робототехники, отражающие перспективу повышения уровня механизации и автоматизации производства сварных конструкций;

- признаки классификации ПР, классификационные подразделения и основные технические и организационно-экономические характеристики их должны быть обозначены индексами, которые используются в планово-учетной документации;

- признаки классификации ПР и классификационные подразделения должны отражать научно-технические достижения и передовой опыт в сварочной робототехнике.

Классификация ПР по изложенной схеме устраняет субъективные решения этой задачи, позволяет осуществлять научный подход к созданию роботизированных участков, поточных линий, комплексно-механизированных и автоматизированных производств. Составными частями их являются: основное, вспомогательное оборудование, ПР, технологическая оснастка и технические средства, используемые при выполнении ряда специфичных работ для роботизированного производства: это составление программ, автономная наладка, контрольно-измерительные операции; учет регламентированных перерывов в работе, всех видов простоя оборудования и ПР, отдачи их в единицу времени; регулирование режимов работы системы машин и т.д.

Классификация ПР является основой изучения характера и степени влияния технических и организационных факторов на экономическую эффективность применения роботов.

Исследование взаимосвязи технических параметров и организационно-экономических показателей ПР – сложная задача ввиду ограниченного количества обобщенных данных по проектированию, производству и использованию ПР.

#### 17.4.3. ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ПР

В данном разделе будут рассмотрены те параметры ПР, от которых непосредственно зависит их стоимость и которые предопределяют целесообразность их применения, а именно: грузоподъемность, точность позиционирования рабочего органа, число степеней

свободы, габаритные размеры и масса, вид привода и тип системы управления.

Установлено, что увеличение грузоподъемности ПР сопровождается, как правило, ростом их стоимости. При правильном выборе привода и системы управления прирост грузоподъемности ПР может превышать увеличение их стоимости в 1,5 – 2 раза.

В зависимости от точности позиционирования и объема памяти стоимость ПР и затраты, связанные с их эксплуатацией, могут отличаться в 1,5 – 3 раза.

Число степеней свободы ПР оказывает следующее влияние на его стоимость: при перемещении рабочего органа ПР по трем осям стоимость на ~30 % выше, чем робота с перемещением рабочего органа по двум осям. Трудоемкость же операций в первом случае меньше, чем во втором, в 1,5 – 2 раза. Это подтверждает целесообразность создания робота с большим числом степеней свободы (четыре – шесть и более).

Вид привода выбирается обычно с учетом грузоподъемности робота. Для ПР малой грузоподъемности (<10 кг) целесообразно применение электрических и пневматических приводов; для средней (до 100 кг) – гидравлических и для большой (до 1000 кг) – комбинированных электрогидравлических приводов. Гидравлические и электрогидравлические приводы отличаются быстродействием, точностью и жесткостью механических характеристик. Однако стоимость роботов небольшой грузоподъемности с этими приводами в 2 – 3 раза больше стоимости ПР с пневматическим приводом. Достоинствами последнего являются: простота конструкции, надежность и возможность работы в необычных условиях (при повышенной температуре, большой запыленности воздуха и т.д.). Во многих случаях эти достоинства оказываются более весомыми, чем его низкий КПД.

От типа системы управления заметно зависят показатели ПР. По характеру программирования, скорости и дискретности перемещений они относятся к классу позиционных или контурных систем ЧПУ. Программирование ПР с позиционным (дискретным) управлением проще программирования с контурным (непрерывным) управлением.

При сварке, сборочно-сварочных и окрасочных операциях, а также во всех случаях, когда необходимо соблюсти определенные условия изменения скорости, целесообразно применять контурное управление с мини-ЭВМ.

Более существенно на стоимость ПР влияют размеры и масса, предопределляемые конструктивно-технологическими особенностями изготавляемых объектов и функциями, выполняемыми роботами.

Зависимость стоимости робота от рассмотренных факторов выражается уравнением множественной корреляции

$$C_{\text{пр}} = Ag^{x_1} \rho^{x_2} c^{x_3} G^{x_4} M^{x_5},$$

где  $A$ ,  $x_1 - x_5$  – искомые неизвестные уравнения;  $g$  – грузоподъемность робота;  $\rho$  – точность позиционирования рабочего органа робота;  $c$  – число степеней свободы робота;  $G$  – масса робота;  $M$  – мощность, потребляемая роботом.

Стоимость ПР может быть снижена в результате совершенствования конструктивных элементов: 1) системы управления (СУ); 2) механической части и силовых приводов, а именно: конструкции СУ; снижения стоимости комплектующих приборов и элементов, входящих в нее; типизации схем СУ роботами; использования в конструкции СУ унифицированных блоков и узлов; разработки прогрессивных принципов управления роботами и роботизированными участками; увеличения объема выпуска ПР; совершенствования конструкции ПР; использования модульного принципа при конструировании ПР; применения стандартных, взаимозаменяемых и конструктивно-преемственных деталей; а также новых прогрессивных видов и марок материала в конструкции ПР.

При выборе ПР для автоматизации производства сварных конструкций анализируются следующие показатели ПР:

- быстродействие, определяемое временем выполнения стандартного объема операций по захвату, перемещению или установке объектов. Быстродействие ПР должно превышать быстродействие человека, выполняющего ту же операцию;

- часовая и годовая производительность:

$$\Pi_{\text{ч}} = 60 / t_{\text{оп}}; \quad \Pi_{\text{г}} = \Pi_{\text{ч}} F_{\text{з}},$$

где  $t_{\text{оп}}$  – время выполнения операции;  $F_{\text{з}}$  – эффективный (расчетный) фонд времени робота,

$$F_{\text{з}} = (1 - \beta_{\text{п}} / 100) q_{\text{ч}} s D_{\text{г}},$$

где  $\beta_{\text{п}}$  – простои в ремонте (по системе планово-предупредительных ремонтов) и наладках;

$q_{\text{ч}}$  – число часов работы робота в смену;  $s$  – число смен его работы;  $D_{\text{г}}$  – число дней его работы в течение года;

- эффективная мощность, характеризующаяся величиной полезной работы, совершенной ПР в единицу времени;

- эксплуатационная универсальность – число выполняемых роботом функций, увеличивающееся с повышением манипуляционной гибкости, совершенствованием захватного органа, возрастанием чувствительности и приспособляемости ПР;

- надежность – выполнение ПР операций по захвату объектов, загрузке технологических машин, соединению собираемых и свариваемых элементов в полном соответствии с требованиями технических условий. Показателем надежности является среднее время наработки до отказа, например для ПР второго поколения равное 800 ч.

При определении эффективности и целесообразности применения ПР кроме перечисленных показателей необходимо учитывать производственные факторы. Наиболее важны из них:

- число единиц оборудования, обслуживаемое одним роботом, для определения которого можно воспользоваться следующей формулой:

$$C_{\text{пр}} < \sum_{i=1}^n T_{\text{ц},i} \left/ \left( \sum_{i=1}^n T_{\text{обс},i} \right) \right. + 1 - n < 1,$$

где  $T_{\text{ц},i}$  – время рабочего цикла единицы оборудования при оптимальном режиме обработки;  $T_{\text{обс},i}$  – время обслуживания роботом этого оборудования;

- возможность рациональной планировки роботизированных участков и поточных линий при размещении ПР непосредственно в зоне рабочих мест;

- качественное улучшение структуры производственного цикла изготовления сварных конструкций и сокращение его величины в результате выполнения ПР ручных вспомогательных операций, сборочных и других работ, а также оптимизации рабочего цикла ПР ( $T_{\text{ПР}}$ ); рабочим циклом ПР называется часть технологического цикла, характеризующая непосредственно время его работы,

$$T_{\text{ПР}} = t_{\text{в}} + t_{\text{п}} + t_{\text{с}} + t_{\text{з}} + t_{\text{и}} + t_{\text{у}},$$

где  $t_b$  – время на выбор детали (заготовки) из общей их совокупности;  $t_p$  – время перемещения детали на рабочую позицию;  $t_c$  – время соединения детали с рабочим органом;  $t_s$  – время закрепления детали в рабочем органе;  $t_i$  – время возврата рабочего органа ПР в исходное положение;  $t_y$  – время удаления детали из рабочей зоны;

- наличие в разработанной (выбранной) модели ПР типовых приводов, схватов, рабочего инструмента, кинематических и других схем, систем управления и т.д., сокращающих сроки создания и внедрения ПР в сварочное производство;

- соответствие технических и эксплуатационных параметров ПР требованиям прогрессивных организационных форм комплексно-механизированного и автоматизированного производства сварных конструкций;

- возможности новой организации труда при предусмотренной компоновке технологического оборудования, ПР, пультов управления, загрузочных и разгрузочных устройств, накопителей, транспортных систем и т.д.;

- целесообразность типизации наладок, повышения технического уровня наладочных работ, специализации наладчиков.

Особенность расчетов годового экономического эффекта от применения ПР состоит не только в определении технической эффективности (повышении уровня механизации и автоматизации производственных процессов, качества продукции и др.) и экономической (сокращении издержек производства, повышении его рентабельности и прибыльности), но и социальной эффективности  $\mathcal{E}_{\text{соц}}$  (социальных результатов), не имеющей строгих количественных мер выражения. Для ПР социальные результаты весьма важны и заслуживают подробного рассмотрения. К ним относятся:

- 1) экономия от снижения производственного травматизма и профессиональных заболеваний

$$\mathcal{E}_{\text{tp}} = (T_1 - T_2) Z_{\text{cd}} K_{\text{пос}},$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – потери рабочего времени из-за временной нетрудоспособности рабочего до и после внедрения промышленного робота, человекодни (по фактическим данным конкретного подразделения);  $Z_{\text{cd}}$  – среднедневная заработка одного рабочего, р.;  $K_{\text{пос}}$  – коэффициент, учитывающий социальные последствия: стоимость амбулаторного и стационарного лечения, пенсии по инвалидности, и т.д.;

- 2) экономия от снижения текучести кадров

$$\mathcal{E}_{\text{т.к}} = \sum_{i=1}^n Y_{ti} (1 - K_{t,o} / K_{t,f}) K_{d,y},$$

где  $n$  – количество категорий (профессий, разрядов) работников;  $Y_{ti}$  – ущерб, нанесенный текучестью работников  $i$ -й категории (профессии, разряда);  $K_{t,o}$ ,  $K_{t,f}$  – ожидаемый и фактический коэффициенты текучести рабочих;  $K_{d,y}$  – коэффициент, учитывающий долю работников, уволившихся из-за неудовлетворительных условий труда, в общем числе – по собственному желанию.

Среднегодовой ущерб, причиненный текучестью кадров,

$$\sum_{i=1}^n Y_{ti} = Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3},$$

где  $Y_{t1}$ ,  $Y_{t2}$  – ущерб вследствие передачи продукции от работников, решивших увольняться, вновь принятым на работу (недоиспользование, недополучение продукции);  $Y_{t3}$  – затраты на обучение вновь принятых рабочих, р.

Ущерб от недополучения продукции от рабочих, решивших уволиться  $Y_{t1}$  и вновь принятых на работу  $Y_{t2}$ ,

$$Y_{t1}(Y_{t2}) = Z_{\text{сд.т}} \beta_{\text{п.т}} T_{\text{уп}} K_{\text{уп}},$$

где  $Z_{\text{сд.т}}$  – среднедневная заработка платы рабочего по тарифу, р.;  $\beta_{\text{п.т}}$  – снижение производительности труда (~25 %) рабочих, увольняющихся с работы и вновь поступающих на работу, %;  $T_{\text{уп}}$  – период времени с момента подачи заявления до увольнения или же с момента поступления на работу до достижения норм выработки, дни;  $K_{\text{уп}}$  – число рабочих, уволившихся и принятых за год.

Затраты, связанные с обучением вновь принятых работников, р. (по тарифу),

$$Y_{t3} = Z_{\text{об}} K_{\text{п.п}},$$

где  $Z_{\text{об}}$  – средние затраты на обучение одного вновь принятого рабочего;  $K_{\text{п.п}}$  – число вновь принятых рабочих;

- 3) экономия от снижения затрат на спецодежду, средства защиты и компенсацию за вредные условия труда

$$\mathcal{E}_{\text{с.с}} = (Z_{\text{с.о}} + Z_{\text{м}}) K_{\text{р.в}},$$

где  $Z_{c.o}$ ,  $Z_m$  – годовые затраты соответственно на спецодежду, средства безопасности в среднем на одного человека (по данным цехов завода),  $p$ ;  $K_{p.v}$  – число относительно высвобожденных работников.

Экономия в результате улучшения социальных факторов

$$\mathcal{E}_{coц} = \mathcal{E}_{tp} + \mathcal{E}_{t.k} + \mathcal{E}_{c.c.}$$

Годовой экономический эффект от применения ПР:

$$\mathcal{E}_{r.pr} = (C_b - C_{pr}) + \mathcal{E}_{coц},$$

где  $C_b$ ,  $C_{pr}$  – годовые приведенные затраты по базовому варианту и с применением ПР.

## 17.5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА

Объем производства сварочных цехов может быть выражен в натуральных, трудовых и стоимостных (ценностных) измерителях.

*Натуральный метод* характеризуется: конкретностью и объективностью количественных и качественных показателей объема производства, простотой их расчета, возможностью полного представления состава номенклатурного задания, динамики и обновления его. Недостатки этого метода: не учитывается незавершенное производство; не обеспечивается сопоставимость выпуска широкой и переменной номенклатуры сварных конструкций; при измерении объема производства в физических тоннах стимулируется изготовление заводами тяжелых, но менее трудоемких сварных конструкций; исключается возможность сравнительной оценки работы различных сварочных цехов. Метод целесообразно применять: для исчисления объема производства одинаковых и однотипных сварных конструкций, при планировании кооперированных поставок, а также сопоставлении производства важных видов сварных конструкций цехов и заводов отрасли.

*Трудовой метод* позволяет исчислять в единицах нормированного времени объем готовых элементов и незавершенное производство на всех стадиях изготовления сварных конструкций; обеспечивает сопоставимость затрат и результатов труда; отличается объективностью оценки технического уровня сварочного производства, степени его механизации и ав-

томатизации; устраняет искажающее влияние на объем производства повторного счета, ассортиментных сдвигов и т.д. Недостатки этого метода: трудность применения ввиду сравнительно небольшой доли технически обоснованных норм времени в общем их объеме; нарушение связи между показателем выработки и конкретной продукцией; непринятие во внимание структуры работ по их сложности и специфики выполнения, что весьма важно при расчете индивидуальной производительности труда. Метод целесообразен для исчисления объема производства сварных конструкций, изготавляемых с применением технически обоснованных и неизменных в течение определенного времени норм, одинаковой степени напряженности; для расчета производительности труда рабочих, выполняющих нормируемые работы.

*Стоимостный (ценностный) метод* характеризуется возможностью измерения всего объема производства (готовых сварных конструкций и незавершенного производства) разных сварочных цехов в сопоставимых (соизмеримых) величинах – денежных затратах; получением обобщенных итоговых результатов их работы; достижением органической связи измерителя объема производства со всеми показателями плана. Недостаток этого метода – зависимость стоимостных показателей от факторов, не являющихся следствием производственной деятельности сварочных цехов и их подразделений. К таким факторам могут быть отнесены производственная структура цеха, уровень специализации и кооперирования, уровень цен на материалы, электроэнергию, топливо и т.д., повторность счета, неточность расчетов ввиду отсутствия нормативов на незавершенное производство, разница цен и т.д. Применять метод целесообразно при планировании, анализе и учете объема производства сварных конструкций с использованием следующих расчетных показателей: незавершенного производства, товарной продукции, нормативной стоимости обработки.

В соответствии с перечисленными методами измерения объема производства сварных конструкций устанавливается практически возможный перечень показателей производительности труда.

Натуральные показатели производительности труда характеризуют число сварных конструкций, узлов, деталей, заготовок; комплектов однотипных заготовок, деталей, узлов;

условных учетных (условно-натулярных) единиц; сварных точек; длины сварных швов, приведенных к одному катету; массы наплавленного металла и массы сварных конструкций, произведенных в единицу времени (час, смену, сутки) или на одного работающего в цехе (на участке, поточной линии).

Натуральные показатели производительности труда:

$$\Pi_p = \frac{N_n}{K_{cn}};$$

$$\Pi_{n,ч} = \frac{N_n}{Q},$$

где  $\Pi_p$ ,  $\Pi_{n,ч}$  – соответственно выработка на одного работающего, на один затраченный нормочас (человекочас);  $N_n$  – объем произведенной продукции, натуральные измерители;  $K_{cn}$  – среднесписочное число работающих;  $Q$  – нормочасы (человекочасы), затраченные на  $N_n$ .

Количество продукции, произведенной на рабочем месте (участке),

$$\Pi_{p,y} = \frac{F_{p,y}}{t_{шт}},$$

где  $F_{p,y}$  – продолжительность анализируемого периода времени работы рабочего места (участка), ч;  $t_{шт}$  – норма времени на изготовление соответственно одной конструкции, узла, детали, заготовки, комплекта или на выполнение 1000 сварных точек, погонной длины шва 1 м; на наплавку 1 кг металла; на производство 1 т сварных конструкций.

Практически возможная область применения натурального показателя: для внутрицехового (внутризаводского) учета производительности труда, анализа динамики индивидуальной производительности труда рабочих (бригад), оценки уровня использования мощности машин и оборудования, расчета опережений в работе рабочих мест, участков и т.д.

Трудовые показатели производительности труда характеризуют число человекочасов или нормочасов, затрачиваемых на: единицу сварного изделия (узел, деталь, заготовку); комплект однотипных сварных заготовок, деталей, узлов; условную учетную (условно-натулярную) единицу или выполнение 1000 сварных точек, погонной длины шва 1 м, наплавку металла, производство 1 т сварных конструкций.

Выработка рабочего (бригады) в виде фактически затраченного рабочего времени на единицу изготовленной (товарной) продукции, выраженной в перечисленных выше измерителях,

$$\Pi_t = \frac{Q}{N_n}.$$

Применять этот показатель целесообразно для: анализа производительности труда в масштабе завода, цеха и рабочего места; оценки затрат труда на каждый вид изготавляемой продукции в любой степени ее готовности; установления динамики их под влиянием технико-организационных факторов и экономии рабочего времени.

Стоимостный показатель производительности труда – это валовая (товарная) продукция в сравнимых оптовых ценах; нормативная стоимость обработки (изготовления), приходящиеся на одного работающего, на один затраченный нормочас (человекочас).

Стоимостные (ценностные) показатели производительности труда:

$$\Pi_{v,p} = \frac{N_v}{K_{cn}};$$

$$\Pi_{v,n} = \frac{N_v}{Q},$$

где  $\Pi_{v,p}$ ,  $\Pi_{v,n}$  – соответственно выработка валовой (товарной) продукции на одного работающего, на один затраченный нормочас (человекочас);  $N_v$  – валовая (товарная) продукция в сравнимых оптовых ценах,

$$N_v = N_t + Z_{и.о.н.},$$

где  $N_t$  – товарная продукция;  $Z_{и.о.н.}$  – изменение остатков незавершенного производства.

Применять стоимостные показатели целесообразно для: соизмерения производительности труда в различных сварочных цехах, на участках и рабочих местах; определения производительности труда с учетом всего объема производства (или разнотипной готовой продукции); сопоставления темпов роста производительности труда и заработной платы; изменения производительности труда на различных этапах производства и при освоении новых сварных конструкций.

При практическом использовании перечисленных методов измерения объема производства сварных конструкций и показателей производительности труда

$$N_{\text{в}} = N_{\text{т}} + (H_{\text{k}} - H_{\text{н}}),$$

где  $H_{\text{k}}$  – незавершенное производство на конец планируемого периода;  $H_{\text{н}}$  – фактический остаток незавершенного производства на начало планируемого периода.

Общая величина незавершенного производства  $H_{\text{н.п}}$  зависит от длительности производственного цикла в днях и среднедневного выпуска продукции сварочным цехом (пролетом, участком)  $N_{\text{д}}$ :

$$H_{\text{н.п}} = f(T_{\text{ц}}, N_{\text{д}}),$$

$$H_{\text{k}} = \frac{H_{\text{н}} N_{\text{с.к}}}{N_{\text{пл}}},$$

где  $N_{\text{пл}}$  – объем выпуска сварных изделий в I квартале планируемого года;  $N_{\text{с.к}}$  – то же, в I квартале года, следующего за планируемым.

Произведенная сварочным цехом продукция по нормативной стоимости обработки (изготовления)

$$N_{\text{н}} = \mathbf{\Phi}_{\text{р.ц}} - (M + K_{\text{пост}} + \Pi_{\text{пр.ц}}),$$

где  $\mathbf{\Phi}_{\text{р.ц}}$  – внутризаводская расчетная цена на продукцию сварочного цеха, р.;  $M$  – стоимость основных материалов, р.;  $K_{\text{пост}}$  – кооперированные поставки (покупные полуфабрикаты и комплектующие детали), р.;  $\Pi_{\text{пр.ц}}$  – прибыль (накопления) цеха за счет снижения себестоимости сварных конструкций;

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^m N_{i\text{ск}} t_{\text{шт}i}}{k_{\text{в}}},$$

где  $m$  – число типоразмеров (позиций номенклатурно-планового задания) сварных изделий, изготавляемых цехом (пролетом, участком, рабочим местом);  $N_{i\text{ск}}$  – число сварных конструкций  $i$ -го типоразмера;  $t_{\text{шт}i}$  – норма штучного времени на  $i$ -ю сварную конструкцию, ч;  $k_{\text{в}}$  – средний коэффициент выполнения норм времени.

## 17.6. ФОРМЫ ОПЛАТЫ ТРУДА

Труд рабочих, занятых изготовлением сварных конструкций, машин и оборудования из сварных элементов, оплачивается по сдельной и повременной формам. При выборе форм оплаты труда предпочтение отдается той, которая стимулирует рост производительности

труда, позволяет контролировать количество и качество затрачиваемого труда и отличается простотой расчета заработной платы рабочих. Этим требованиям в полной мере отвечает сдельная форма, если производство сварных конструкций характеризуется наличием: работ, поддающихся нормированию; возможностей организации учета индивидуальной и коллективной выработки рабочих, а также резервов роста производительности труда и увеличения выпуска сварных изделий без ухудшения их качества. При отсутствии указанных предпосылок (в частности, при оплате ненормированных работ) и в условиях косвенного влияния рабочих на количество изготавливаемых сварных конструкций и их элементов применяется повременная форма.

Преобладающей системой оплаты труда производственных рабочих на заготовительных, обрабатывающих, сборочно-сварочных и отделочных операциях является прямая сдельная оплата. Здесь основой расчета заработной платы рабочего служат сдельная расценка  $P$  и количество произведенной рабочим продукции (сварных деталей, метров сварных швов, объема наплавленного металла и т.д.) за смену и за месяц.

Заработка платы основных производственных рабочих сварочных цехов при *прямой сдельной оплате труда*

$$Z_{\text{п.с}} = \sum_{i=1}^m N_i P_i,$$

где  $N_i$  – количество  $i$ -й продукции, изготовленной рабочим (заготовок, деталей, узлов  $i$ -го типоразмера, или погонная длина сварного шва  $i$ -го типа, получаемого тем или иным способом сварки);  $m$  – число типоразмеров заготовок, деталей, узлов и типов сварных швов;  $P_i$  – расценка за единицу  $i$ -й продукции (штуку, деталь – операцию, погонную длину сварного шва, тонну и т.п.), р. (к.).

В общем виде сдельная расценка определяется по формуле

$$P = \mathbf{\Phi}_{\text{т}} t_{\text{шт}}$$

или

$$P = \frac{\mathbf{\Phi}_{\text{т}}}{H_{\text{вып}}},$$

где  $\mathbf{\Phi}_{\text{т}}$  – часовая тарифная ставка рабочего данного разряда, р. (к.);  $H_{\text{вып}}$  – норма выработки за 1 ч в штуках, метрах сварного шва и т.п.

*Заработка плата при сдельно-прогрессивной оплате труда*

$$З_{с.п} = N_{пл} P_0 + N_{св} P_{п.н},$$

где  $N_{пл}$  – объем работ, выполненных в пределах нормы;  $P_0$  – основная сдельная расценка;  $N_{св}$  – объем работ, выполненных сверх нормы;  $P_{п.н}$  – повышенная (прогрессивно-нарастающая) расценка.

При *коллективно-сдельной оплате*, применяемой при бригадной организации труда, заработка плата каждого члена бригады:

$$З_k = \frac{\sum_{n=1}^m N_n P_n F_i k_i}{\sum_{i=1}^a F_i k_i},$$

где  $m$  – число видов работ, выполняемых бригадой;  $N_n$  – объем работ  $n$ -го вида, нормочасы;  $P_n$  – расценка за единицу работы (шт., 1 т сварной конструкции, 1 кг наплавленного металла и т.п.)  $n$ -го вида;  $a$  – число разрядов;  $F_i$  – число часов, отработанных рабочим  $i$ -го разряда;  $k_i$  – тарифный коэффициент  $i$ -го разряда (или часовая тарифная ставка).

*Заработка плата при повременной оплате труда*

$$З_{пов} = Ч_t F_0,$$

где  $F_0$  – число часов, отработанных рабочим определенного разряда за отчетный период.

*Повременная оплата труда* применяется при выполнении работ, которые нельзя пронормировать и весьма трудно учитывать (слесарно-ремонтные, монтажные, наладочные, подналадочные и пр.), а также в комплексно-механизированном, автоматизированном производстве сварных конструкций, когда производительность труда рабочих предопределяется ритмом поточных линий, степенью непрерывности функционирования машин и оборудования и прогрессивностью технологических режимов. Заработную плату рабочего при этой системе определяют исходя из продолжительности фактически отработанного рабочего времени (число часов, дней) и его квалификации, отраженной в часовой (дневной) тарифной ставке.

*Аккордная оплата труда* применяется при выполнении сложных и ответственных

сварочных работ, представляющих собой комбинированный процесс из заготовительных, обрабатывающих, сборочно-сварочных, отделочных и других операций. Дифференцированное нормирование затрат рабочего времени на эти работы затруднено спецификой производственных условий, предопределяющей необходимость широкого совмещения профессий рабочими. Поэтому норма времени и сдельная расценка  $P_{ак}$  устанавливаются сразу на весь объем работы  $N_{ак}$ :

$$З_{ак} = \sum_{i=1}^n P_{акi},$$

где  $n$  – число наименований (видов) выполняемых аккордных работ;  $P_{акi}$  – сдельная расценка, установленная на весь объем  $i$ -го наименования аккордных работ  $N_{акi}$ ,

$$N_{ак} = \sum_{i=1}^n N_{акi}.$$

*Сдельно-премиальная и повременная оплата труда* сравнительно широко применяются в сварочных цехах для стимулирования бездефектного изготовления заготовок, деталей, сварных элементов и конструкций в целом.

В качестве обобщенного показателя объема производства сварных конструкций и производительности труда в сварочных цехах заводов единичного и серийного производства может быть принята оптимизированная (приведенная) тонна сварных конструкций:

$$G_{о.т} = G_{φ} k_{пр} = G_{φ} \frac{g_i}{g_{тип}},$$

где  $G_{φ}$  – выпуск сварных конструкций в традиционном измерителе – физических тоннах;  $k_{пр}$  – коэффициент перевода выпуска сварных конструкций  $G_{φ}$  (в физических тоннах) в оптимизированные  $G_{о.т}$  (приведенные) тонны,

$$k_{пр} = \frac{g_i}{g_{тип}},$$

где  $g_i$  – нормативная трудоемкость изготовления  $i$ -го сварного изделия;  $g_{тип}$  – нормативная трудоемкость изготовления сварного изделия, принятого за типовой представитель определенной совокупности сварных конструкций, изготавляемых сварочным цехом.

### 17.7. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Определяется следующий перечень показателей, характеризующих сварные конструкции, как объект производства и эксплуатации.

**Материалоемкость проектируемых сварных конструкций.** Она равна

$$G_{\text{чep}} = \sum_1^m G_{\text{ct}} n_{\text{ct}} + \sum_1^m G_{\text{cp}} n_{\text{cp}} + \dots + \sum_1^m G_{\text{h}} n_{\text{cb}},$$

где  $G_{\text{ct}}$ ,  $G_{\text{cp}}$  – масса исходного металла (черная масса) для детали определенного наименования (типоразмера) из стали и сплавов соответствующих марок;  $n_{\text{ct}}$ ,  $n_{\text{cp}}$  – число деталей данного наименования и массы из материала определенной марки, входящих в сварную конструкцию;  $n_{\text{cb}}$  – число сварных деталей (узлов) данного наименования (типоразмера);  $m$  – число деталей разных наименований (типоразмеров), изготавляемых из сталей (сплавов) определенных марок;  $G_{\text{h}}$  – масса наплавляемого металла определенного вида и марки;

$$G_{\text{чep}} = G_{\text{q}} / K_{\text{исп}},$$

где  $G_{\text{q}}$  – масса сварной конструкции, изготовленной на данном заводе (чистая масса);  $K_{\text{исп}}$  – коэффициент использования металла;

$$K_{\text{исп}} = \frac{G_{\text{q}}}{G_{\text{чep}}}.$$

**Удельная (конструктивная) материалоемкость**

$$M_{\text{уд}} = \frac{G}{P},$$

где  $G$  – масса машины, поступающей в эксплуатацию (рабочая масса), т;  $P$  – наиболее характерный показатель работоспособности машины (мощность, производительность и т.д.).

**Технологическая материалоемкость**

$$M_{\text{т}} = \frac{G_{\text{чep}} - G_{\text{o.p}}}{P},$$

где  $G_{\text{o.p}}$  – отходы и потери материалов, т (кг).

**Материалоемкость сварной конструкции в стоимостном исчислении**

$$C_{\text{м}} = \sum_1^m G_{\text{ct}} n_{\text{ct}} \Pi_{\text{ct}} - G_{\text{o.ct}} \Pi_{\text{o.ct}} + \\ + \sum_1^m G_{\text{cp}} n_{\text{cp}} \Pi_{\text{cp}} - G_{\text{o.cp}} \Pi_{\text{o.cp}} + \sum_1^m G_{\text{h}} n_{\text{cb}} \Pi_{\text{нап}},$$

где  $\Pi_{\text{ct}}$ ,  $\Pi_{\text{cp}}$ ,  $\Pi_{\text{нап}}$  – цена за единицу массы (т, кг) определенной марки стали, сплава и наплавленного металла с учетом затрат на их приобретение;  $G_{\text{o.ct}}$ ,  $G_{\text{o.cp}}$  – реализуемые отходы, т (кг);  $\Pi_{\text{o.ct}}$ ,  $\Pi_{\text{o.cp}}$  – цена за единицу реализуемых отходов, р.

**Трудоемкость сварной конструкции.** Общая трудоемкость сварной конструкции с учетом основных видов работ (в нормочасах на конструкцию):

$$Q_{\text{об}} = Q_{\text{под}} + Q_{\text{и.эл}} + Q_{\text{с.с}} + Q_{\text{отд}},$$

где  $Q_{\text{под}}$  – затраты времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства;  $Q_{\text{и.эл}}$  – затраты времени на изготовление элементов, входящих в сварную конструкцию (на заготовительные работы, механическую и термическую обработку, кузнецкие, штамповочные и другие работы);  $Q_{\text{с.с}}$  – затраты времени на сборочные и сварочные работы;  $Q_{\text{отд}}$  – затраты времени на правку, покраску и другие отделочные работы; или

$$Q_{\text{об}} = G_{\text{q}} Q_{\text{ср}},$$

где  $Q_{\text{ср}}$  – средняя трудоемкость изготовления единицы массы существующих конструкций тех же типа и назначения.

$$Q_{\text{об}} = \sum_1^m Q_{\text{ср}i} k_{\text{i.t}} n_i,$$

где  $Q_{\text{ср}i}$  – средняя трудоемкость  $i$ -й детали существующей конструкции (аналогичной по назначению проектируемой);  $k_{\text{i.t}}$  – коэффициент, учитывающий изменение трудоемкости  $i$ -й детали проектируемой конструкции и аналогичной  $i$ -й детали существующей конструкции;  $n_i$  – число  $i$ -х деталей;  $m$  – число наименований аналогичных деталей в сравниваемых конструкциях;

$$m = m_{\text{об}} - m_{\text{ct}},$$

где  $m_{\text{об}}$  – общее число деталей;  $m_{\text{ct}}$  – крепежные и другие стандартные детали конструкции.

*Удельная трудоемкость – трудоемкость единицы массы конструкций в нормочасах на 1 т массы конструкции*

$$Q_{уд} = \frac{Q_{об}}{G_q}.$$

*Коэффициент унификации сварной конструкции*

$$k_{ун} = \frac{N_{ct} + N_{к.п} + N_{в.з}}{N_{об}},$$

где  $N_{ct}$ ,  $N_{к.п}$ ,  $N_{в.з}$  – соответственно число стандартных, конструктивно-преемственных и взаимозаменяемых деталей в проектируемой конструкции;  $N_{об}$  – общее число деталей в конструкции.

Более точно (с учетом трудоемкости деталей) коэффициент унификации

$$k_{ун} = \frac{\sum_1^m N_{ct} Q_{ct} + \sum_1^m N_{к.п} Q_{к.п} + \sum_1^m N_{в.з} Q_{в.з}}{\sum_1^m N_{об} Q_{ср}},$$

где  $Q_{ct}$ ,  $Q_{к.п}$ ,  $Q_{в.з}$  – соответственно число нормочасов (в среднем) на изготовление единицы стандартных, конструктивно-преемственных и взаимозаменяемых деталей определенного наименования;  $Q_{ср}$  – число нормочасов (в среднем) на изготовление детали проектируемой конструкции определенного наименования;  $N_{ct}$ ,  $N_{к.п}$ ,  $N_{в.з}$  – соответственно число стандартных, конструктивно-преемственных и взаимозаменяемых деталей данного наименования;  $m$  – число наименований (типоразмеров) деталей;  $N_{об}$  – общее число деталей в конструкции определенного наименования (типоразмера).

*Коэффициент соотношения длины сварных швов и массы конструкции*

$$k_{д.м} = \frac{l_{св}}{G_q},$$

где  $l_{св}$  – общая длина сварных швов, м.

*Коэффициент соотношения массы наплавленного металла и массы конструкции*

$$k_{н.м} = \frac{G_{н.м}}{G_q},$$

где  $G_{н.м}$  – масса наплавленного металла при выполнении сварных швов конструкции.

*Коэффициенты механизации и автоматизации сварочных работ по протяженности швов*

$$k_{м.п.ш} = \frac{l_{св.а.м}}{l_{св}};$$

*по массе наплавленного металла*

$$k_{н.м} = \frac{G_{н.м.а.м}}{G_h},$$

где  $l_{св.а.м}$  – длина сварных швов, выполненных автоматической и механизированной сваркой;  $G_{н.м.а.м}$  – масса металла, наплавленного автоматической и механизированной сваркой.

*Коэффициент механизации и автоматизации заготовительных работ (операций)*

$$k_{з.м.а} = \frac{Q_{з.м.а}}{Q_{0.3}},$$

где  $Q_{з.м.а}$  – объем заготовительных механизированных и автоматизированных работ, выполняемых при изготовлении сварной конструкции (нормочасы, человекочасы);  $Q_{0.3}$  – общий объем заготовительных работ на сварную конструкцию (нормочасы, человекочасы).

*Стоимость сварной конструкции*

$$C_{кон} = C_{с.кон} a_{ усл (упр)},$$

где  $C_{с.кон}$  – стоимость существующей конструкции, по назначению аналогичной проектируемой;  $a_{ усл (упр)}$  – коэффициент усложнения или упрощения проектируемой конструкции по сравнению с существующей.

$$C_{кон} = C_{A.ср} N_{A.п} + C_{B.ср} N_{B.п} + \dots + C_{K.ср} N_{K.п},$$

где  $C_{A.ср}$ ,  $C_{B.ср}$ , ...,  $C_{K.ср}$  – соответственно средняя стоимость деталей; А, Б, ..., К – наименования существующей конструкции (аналогичной проектируемой);  $N_{A.п}$ ,  $N_{B.п}$ , ...,  $N_{K.п}$  – число деталей того же типа и назначения в проектируемой конструкции:

$$C_{кон} = G_{п.кон} C_r,$$

где  $G_{п.кон}$  – ориентировочная масса проектируемой конструкции;  $C_r$  – стоимость 1 т массы готовой конструкции аналогичного назначения.

$$C_{кон} = C_m + 3_{осн} \left( 1 + \frac{a}{100} + \frac{b}{100} + \frac{v}{100} \right) + \frac{C_{пр}}{N_v},$$

где  $C_m$  – стоимость материалов, израсходованных на сварную конструкцию;  $Z_{osn}$  – основная заработка рабочих с доплатами к тарифу;  $a$  – в – соответственно косвенные цеховые, общезаводские и внепроизводственные расходы от  $Z_{osn}$ , %;  $C_{pr}$  – затраты на проектирование и освоение конструкции;  $N_b$  – масштаб выпуска сварных конструкций.

$$Z_{osn} = \sum_1^m Q_d q_t \gamma_{dop},$$

где  $Q_d$  – трудоемкость детали определенного наименования;  $q_t$  – средняя часовая тарифная ставка рабочих;  $\gamma_{dop}$  – коэффициент, учитывающий доплаты к тарифу;  $m$  – число наименований деталей, входящих в сварную конструкцию.

*Удельные затраты, приходящиеся на единицу массы (1 т) спроектированной сварной конструкции,*

$$C_{ud} = \frac{C_{kon}}{G_q}.$$

*Дополнительные затраты на изготовление спроектированной конструкции*

$$C_{dop} = C_{kon} - C_{c.kon},$$

где  $C_{c.kon}$  – затраты на изготовление существующей конструкции, по назначению аналогичной проектируемой; дополнительные затраты, приходящиеся на единицу массы (1 т) спроектированной сварной конструкции,

$$C_{ud.dop} = C_{ud} - C_{ud.c},$$

где  $C_{ud.c}$  – себестоимость существующей конструкции.

*Коэффициент безотказности сварной конструкции (изделия, узла)*

$$K_{b.k} = \frac{m_{cp}}{T},$$

где  $K_{b.k}$  – среднее число рабочих периодов, отработанных сварной конструкцией (изделием, узлом) между двумя отказами;  $m_{cp}$  – средняя наработка на отказ;  $T$  – продолжительность рабочего (эксплуатационного) периода сварной конструкции (изделия, узла);

$$m_{cp} = \frac{1}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Для элементов с длительным рабочим периодом вместо  $\lambda$  используют термин «поток отказов»  $\omega(t)$ ; он численно представляет собой среднюю вероятность отказа элемента (узла); тогда

$$m_{cp} = \frac{1}{\omega(t)}.$$

Эргономический уровень качества сварной конструкции по выбранному критерию

$$y = \frac{k_1}{k_3},$$

где  $k_1$  – частное значение эргономического критерия (производительность, точность, скорость и т.д.), соответствующее оцениваемому значению эргономического параметра;  $k_3$  – максимальное значение эргономического критерия, принятого за эталон, соответствующее оптимальному значению эргономического параметра.

При частном значении оцениваемого эргономического параметра производительности  $\Pi_1$

$$k_1 = f(\Pi_1); \quad k_3 = f(\Pi_{opt}),$$

где  $\Pi_{opt}$  – оптимальное значение эргономического параметра;

$$y = \frac{f(\Pi_1)}{f(\Pi_{opt})}.$$

Эргономический уровень качества по комплексному эргономическому критерию

$$K_k = f'(K_1, K_2, \dots, K_n),$$

где  $K_k$  – комплексный эргономический критерий, наиболее полно характеризующий эргономический уровень качества сварного изделия;

$$y = \frac{f'(k_1, k_2, \dots, k_n)}{f'(k_{1opt}, k_{2opt}, \dots, k_{n opt})},$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – рассматриваемые частные критерии;  $k_{1opt}, k_{2opt}, \dots, k_{n opt}$  – оптимальные значения этих же частных критериев.

## 17.8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ (СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ) ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Экономические расчеты в данном случае включают в себя определение единовременных капитальных вложений по сравниваемым вариантам технологических процессов (ТП) и затрат на изготовление сварных конструкций при применении этих вариантов. Капитальные вложения (единовременные) по сравниваемым вариантам ТП

$$K_e = \sum_1^m K_{np} + \sum_1^m K_{tp} + \sum_1^m K_{n,p} + \sum_1^m K_3 + \\ + \sum_1^m K_m + \sum_1^m K_{n,k} + \sum_1^m K_l,$$

где  $m$  – число наименований (видов) необходимого производственного оборудования;  $K_{np}$ ,  $K_{tp}$ ,  $K_{n,p}$ ,  $K_3$ ,  $K_m$ ,  $K_{n,k}$ ,  $K_l$  – соответственно затраты на все виды производственного оборудования, подъемно-транспортных средств и передаточных устройств, приспособлений и приборов, зданий и сооружений, модернизацию ранее приобретенного оборудования, проектно-конструкторские разработки и опытные работы, стоимость ликвидируемых основных фондов, равная величине невозмещенных через амортизацию первоначальных капитальных вложений за вычетом из нее средств от реализации ликвидированных основных фондов

$$K_{np} = \sum_1^m C_i c_i \quad \text{или} \quad K_{cb} = \sum_1^m C_{cb,i} c_{cb,i},$$

где  $K_{np}$ ,  $K_{cb}$  – сумма капитальных вложений соответственно во все виды оборудования и, в частности, в сварочное;  $C_i$ ,  $C_{cb,i}$  – стоимость единицы  $i$ -го оборудования и, в частности,  $i$ -го сварочного оборудования по ценам действующих прейскурантов;  $c_i$ ,  $c_{cb,i}$  – число единиц  $i$ -го оборудования и, в частности,  $i$ -го сварочного оборудования;

$$c_i = \frac{Q_i}{F_{\text{фак}}} \quad \text{или} \quad c_i = \frac{Q'_i}{F_{\text{реж}} \alpha_i \beta_i},$$

где  $Q_i$  – необходимое число машиночасов с учетом переработки норм времени для выпол-

нения годового объема определенного рода работ (заготовительных, обрабатывающих, сборочных, сварочных и др.)  $i$ -м видом оборудования;  $F_{\text{фак}}$  – фактический (эффективный) фонд времени работы единицы  $i$ -го оборудования, машиночасы;  $Q'_i$  – то же, что и  $Q_i$ , но без учета переработки норм времени, машиночасы;  $F_{\text{реж}}$  – режимный (номинальный) годовой фонд времени работы единицы  $i$ -го оборудования, машиночасы;  $\alpha_i$  – средний коэффициент выполнения норм выработки на операции, осуществляющей  $i$ -м видом оборудования ( $\alpha_i = 1,5 \dots 2,0$ );  $\beta_i$  – коэффициент использования режимного годового фонда времени  $i$ -го оборудования ( $\beta_i = 0,92 \dots 0,96$ , так как время простое оборудования в плановом ремонте составляет 4...8 %  $F_{\text{реж}}$ ).

Общее количество необходимого производственного оборудования по сравниваемым вариантам ТП

$$c_{ob} = \sum_1^m (c_{n,i} + c_{p,i}),$$

где  $m$  – число видов (наименований) технологического наличного или вновь приобретенного оборудования;  $c_{n,i}$ ,  $c_{p,i}$  – соответственно число единиц наличного и вновь купленного оборудования определенного назначения.

$$K_{tp} = \sum_1^m C_{tp,i} c_{tp,i},$$

где  $m$  – число наименований транспортных средств;  $C_{tp,i}$  – стоимость единицы транспортных средств  $i$ -го наименования;  $c_{tp,i}$  – число единиц транспортных средств  $i$ -го наименования.

Число единиц транспортных средств прерывного действия

$$c_{tp,n} = \frac{Q_{cyt}}{P_{cyt}},$$

где  $Q_{cyt}$  – суточный грузопоток, т;  $P_{cyt}$  – суточная производительность оборудования, т.

Число мостовых электрических кранов

$$c_{kp} = \frac{N_{tp} i t_u}{F_{\text{реж}} \beta},$$

где  $N_{\text{тр}}$  – число сварных конструкций (узлов, изделий), подлежащих транспортировке краном в течение года;  $i$  – среднее число крановых операций на одну конструкцию (изделие);  $t_u$  – длительность одного кранового цикла;  $\beta$  – коэффициент использования режимного фонда времени крана.

Ориентировочное число средств непрерывного транспорта или конвейеров

$$c_{\text{кон}} = \frac{Q_u}{P_u},$$

где  $Q_u$  – часовой грузопоток, т;  $P_u$  – часовая производительность конвейера, т.

Соответственно капитальные вложения в приспособления и приборы

$$K_{\text{прис}} = \sum_1^m C_i \text{прис} c_i \text{прис};$$

$$K_{\text{приб}} = \sum_1^m C_i \text{приб} c_i \text{приб},$$

где  $m$  – число типоразмеров (наименований) приспособлений или приборов;  $C_i \text{прис}$ ;  $C_i \text{приб}$  – стоимость единицы приспособления или прибора  $i$ -го типоразмера; число приспособлений данного типоразмера

$$c_i \text{прис} = \frac{N_{\text{пр}i} t_{\text{пр}}}{F_{\text{реж}}},$$

где  $N_{\text{пр}i}$  – количество продукции, обрабатываемой с применением приспособления  $i$ -го типоразмера;  $t_{\text{пр}}$  – время занятости приспособления для изготовления единицы продукции.

Капитальные вложения в здания

$$K_3 = V_3 C_m,$$

где  $V_3$  – объем зданий, м<sup>3</sup>,  $C_m$  – стоимость 1 м<sup>3</sup> здания, р.

Затраты на проектно-конструкторские разработки и опытные работы определяют по утвержденным сметам.

Производительность машин и оборудования, используемых для выполнения вариантов ТП, определяется по формулам, специфичным для каждого типа оборудования, предназначенного для осуществления заготовительных, сборочно-сварочных и других работ, характер-

ных для сравниваемых вариантов. Комплексный ТП изготовления сварных конструкций проводится с помощью заготовительного, обрабатывающего, сборочно-сварочного, транспортного и других видов машин. Производительность того или иного вида машин определяется по формулам, специфичным для каждого из них.

Затраты, связанные с работой оборудования, используемого для выполнения сравниваемых вариантов ТП,

$$C_{\text{обор}} = \sum_1^m (C_{a,i} + C_{p,i} + C_{c,3,i} + C_{n,i} + C_{np,i} + C_{vcp,i} + Z_{vcp,i} + C_{3,i}),$$

где  $m$  – число наименований оборудования, требуемого для выполнения того или иного варианта ТП;  $C_{a,i}$  – амортизационные отчисления по оборудованию  $i$ -го наименования;  $C_{p,i}$  – затраты на текущий ремонт оборудования  $i$ -го наименования;  $C_{c,3,i}$  – затраты на силовую электроэнергию, потребляемую оборудованием  $i$ -го наименования;  $C_{n,i}$ ;  $C_{pr,i}$  – затраты, связанные с эксплуатацией инструмента и приспособлений оборудования  $i$ -го наименования;  $C_{vcp,i}$  – затраты на смазочные, обтирочные и другие вспомогательные материалы, используемые при эксплуатации оборудования  $i$ -го наименования;  $Z_{vcp,i}$  – заработка плата вспомогательных рабочих, обслуживающих оборудование;  $C_{3,i}$  – затраты на содержание зданий, приходящиеся на оборудование  $i$ -го наименования.

$$C_{a,i}^1 = \frac{\sum_1^m (K_n + K_{p,m}) c_n a_n K_{3,n}}{100 N_r},$$

где  $m$  – число типоразмеров оборудования  $i$ -го наименования;  $K_n$  – балансовая стоимость оборудования  $n$ -го типоразмера;  $K_{p,m}$  – затраты на капитальный ремонт и модернизацию оборудования  $n$ -го типоразмера;  $c_n$  – число единиц оборудования  $n$ -го типоразмера;  $a_n$  – норма (процент) годовых амортизационных отчислений;  $K_{3,n}$  – коэффициент занятости оборудования  $n$ -го типоразмера;  $N_r$  – годовая программа запланированных к изготовлению сварных конструкций.

Амортизационные отчисления по оборудованию, по которому отсутствуют утвержденные нормы амортизации,

$$C_{\text{а} i \text{o}} = \frac{(K_j - K_{\text{ост} j}) c_j k_{3 j}}{T_{\text{а} j} N_{\Gamma}},$$

где  $K_j$ ,  $K_{\text{ост} j}$  – балансовая и остаточная стоимость  $i$ -го наименования оборудования  $j$ -го типоразмера;  $c_j$  – число единиц оборудования  $j$ -го типоразмера;  $T_{\text{а} j}$  – коэффициент занятости  $i$ -го оборудования  $j$ -го типоразмера.

Затраты на текущий ремонт и модернизацию  $i$ -го оборудования

$$C_{\text{р} i} = \sum_1^m \frac{(R_n K_{\text{р} n} + K_{\text{м} n}) C_n K_{3 n}}{T_{\text{ц} n} N_{\Gamma}},$$

где  $R_n$  – группа ремонтной сложности оборудования  $n$ -го типоразмера;  $K_{\text{р} n}$  – общая сумма затрат на все виды ремонтов и межремонтного обслуживания за ремонтный цикл, приходящаяся на единицу ремонтной сложности оборудования  $n$ -го типоразмера;  $K_{\text{м} n}$  – затраты на модернизацию единицы оборудования  $n$ -го типоразмера за один ремонтный цикл;  $T_{\text{ц} n}$  – продолжительность ремонтного цикла оборудования  $n$ -го типоразмера.

Затраты на силовую электроэнергию  $i$ -го наименования оборудования (при укрупненных расчетах)

$$C_{\text{с.э} i} = \sum_1^m \frac{M_n k_{3,д} k_{3,м} k_{0,р} k_{\text{п.э}} t_{\text{в}} \Pi_{\text{э}}}{\eta_n k_{\text{в.н}}},$$

где  $m$  – число типоразмеров оборудования  $i$ -го наименования;  $M_n$  – суммарная установленная мощность электродвигателей оборудования  $n$ -го типоразмера (определяется по паспортам оборудования);  $k_{3,д} \geq 0,4 \dots 0,8$  – коэффициент загрузки двигателей оборудования  $n$ -го типоразмера;  $k_{3,м}$  – коэффициент загрузки по мощности электродвигателей оборудования  $n$ -го типоразмера;  $k_{0,р}$  – коэффициент одновременности работы двигателей оборудования  $n$ -го типоразмера;  $k_{\text{п.э}} \geq 1,04 \dots 1,08$  – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии в сети;  $t_{\text{в}}$  – норма времени на выполнение операций ТП;  $\Pi_{\text{э}}$  – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии (по данным заводов);  $\eta_n$  – средний КПД элек-

тродвигателей оборудования  $n$ -го типоразмера;  $k_{\text{в.н}}$  – коэффициент выполнения норм времени.

Затраты, связанные с эксплуатацией инструмента  $i$ -го наименования,

$$C_{\text{и} i} = \sum_1^m C_{\text{и} n},$$

где  $m$  – число типоразмеров инструментов  $i$ -го наименования;  $C_{\text{и} n}$  – общая сумма затрат, связанных с эксплуатацией инструмента  $n$ -го типоразмера (по заводским данным).

Затраты на эксплуатацию приспособлений  $i$ -го наименования

$$C_{\text{п} i} = \sum_1^m \frac{(C_{\text{п} n} k_n - C_{\text{с} n}) c_n k_{3 n}}{T_{\text{а} n} N_{\Gamma}},$$

где  $m$  – число типоразмеров приспособления  $i$ -го наименования;  $C_{\text{п} n}$  – балансовая стоимость приспособления  $n$ -го типоразмера;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий затраты на ремонт приспособлений  $n$ -го типоразмера (по ориентировочным заводским данным, для сварочных цехов  $k_n \geq 0,2 \dots 0,4$ );  $C_{\text{с} n}$  – стоимость списанного приспособления  $n$ -го типоразмера;  $c_n$  – число единиц приспособлений (в комплекте)  $n$ -го типоразмера;  $k_{3 n}$  – коэффициент занятости приспособления  $n$ -го типоразмера;  $T_{\text{а} n} \geq 2 \dots 4$  года – амортизационный период  $n$ -го типоразмера приспособления.

Затраты на смазочные и обтирочные материалы, используемые при эксплуатации оборудования  $i$ -го наименования,

$$C_{\text{всп} i} = \frac{\sum_1^m C_{\text{всп} n} c_n k_{3 n}}{N_{\Gamma}},$$

где  $m$  – число типоразмеров оборудования  $i$ -го наименования;  $C_{\text{всп} n}$  – годовые затраты на вспомогательные материалы, расходуемые единицей оборудования  $n$ -го типоразмера (по данным заводов);  $c_n$  – число единиц оборудования  $n$ -го типоразмера;  $k_{3 n}$  – коэффициент занятости оборудования  $n$ -го типоразмера.

Заработка платы вспомогательных рабочих, обслуживающих оборудование,

$$Z_{\text{всп}} = \Psi_{\text{ср.т}} t_{\text{обсл}} k_{\text{доп}},$$

где  $Ч_{ср.т}$  – среднечасовая тарифная ставка рабочих;  $t_{обсл}$  – время, затрачиваемое рабочим на обслуживание оборудования;  $k_{доп}$  – коэффициент, учитывающий доплаты к тарифной заработной плате (по общепринятым для машиностроительных заводов данным).

Затраты на содержание зданий, приходящиеся на оборудование  $i$ -го наименования,

$$C_{з.i} = \frac{\sum_1^m F_{пр.n} k_{з.n} C_n C_{ср.год} k_{д.п}}{N_r},$$

где  $F_{пр.n}$  – производственная площадь (в плане), занимаемая оборудованием  $n$ -го типоразмера,  $m^2$ ;  $k_{д.п}$  – коэффициент, учитывающий дополнительную площадь;  $C_{ср.год}$  – среднегодовые затраты на содержание зданий, приходящиеся на  $1 m^2$  площади сварочною цеха.

Величина  $C_{обор}$  ( $i$ -го наименования или типоразмера оборудования) при укрупненных расчетах может быть определена по стоимости машиночаса или машиносмены ( $C_{мч.i}$  или  $C_{mc.i}$ ):

$$C_{мч.i} = C_{мч.баз} k_{мч.i}$$

или

$$C_{mc.i} = C_{mc.баз} k_{mc.i},$$

где  $C_{мч.баз}$  или  $C_{mc.баз}$  – соответственно стоимость машиночаса и машиносмены работы оборудования, принятого за условную единицу (базу);  $k_{мч.i}$  или  $k_{mc.i}$  – коэффициенты, показывающие, во сколько раз затраты  $C_{мч.i}$  или  $C_{mc.i}$ , приходящиеся на 1 ч (смену) работы данного  $i$ -го вида оборудования, больше или меньше  $C_{мч.баз}$  или  $C_{mc.баз}$ .

Затраты на основные материалы (листовой и профильный прокат, заготовки и т.д.), расходуемые по сравниваемым вариантам ТП изготовления единицы сварной конструкции (детали, узла),

$$C_m = \sum_1^b H_i \Pi_i k_i - g_{o.i} \Pi_{o.i},$$

где  $b$  – число наименований или марок материалов, используемых при изготовлении сварных конструкций;  $H_i$  – норма расхода материала  $i$ -й марки ( $i$ -го наименования);  $\Pi_i$  – оптовая цена материалов  $i$ -й марки ( $i$ -го наименования);  $k_i$  – коэффициент, учитывающий транспортно-

заготовительные расходы при покупке материала  $i$ -го наименования (ориентировочно может быть принят 1,05...1,08);  $g_{o.i}$  – реализуемые отходы материала  $i$ -го наименования;  $\Pi_{o.i}$  – цена отходов материала  $i$ -го наименования.

Затраты на вспомогательные материалы технологического назначения

$$C_{всп.m} = C_{эл} + C_{э.п} + C_{пр.m} + C_r + C_{эл.m} + C_\phi,$$

где  $C_{эл}$ ,  $C_{э.п}$ ,  $C_{пр.m}$ ,  $C_r$ ,  $C_{эл.m}$ ,  $C_\phi$  – затраты соответственно на электроды, электродную проволоку, присадочные материалы, газ (защитный и горючий), электродный материал, флюсы.

$$C_{эл} = \sum_1^{b_{эл}} q_{i эл} \Pi_{i эл},$$

где  $b_{эл}$  – число наименований и типоразмеров электродов;  $q_{i эл}$  – масса наплавленного металла электродом  $i$ -го наименования и типоразмера;  $\Pi_{i эл}$  – цена за 1 кг электрода  $i$ -го наименования и типоразмера;

$$q_{i эл} = \sum_1^m \frac{q_{эл.н}}{k_{пер}} (1 + k_3),$$

где  $m$  – число наименований деталей (узлов), входящих в сварную конструкцию;  $q_{эл.н}$  – масса наплавленного металла (определенного состава) на  $i$ -ю деталь (узел);  $k_{пер}$  – коэффициент перехода металла электродов в сварной шов [с учетом потерь на угар, разбрзгивание и огарки  $k_{пер}$  принимают равным: 0,65...0,75 для электродов с тонким покрытием; 0,80...0,90 – электродов с толстым покрытием; 0,95...0,98 для присадочной проволоки при сварке (газовой и дуговой) в углекислом газе и аргоне; 0,92...1,00 для электродной проволоки при автоматической сварке под флюсом];  $k_3$  – коэффициент, характеризующий отношение массы электродного покрытия к массе электродной проволоки; этот коэффициент определяют по паспортным данным электродов, а при ориентировочных расчетах принимают равным 0,4.

Цены  $\Pi_{эл}$  на электроды берут по действующим прейскурантам оптовых цен, к которым прибавляют затраты на их приобретение:

$$C_{э.п} = \sum_1^{b_{э.п}} q_{i э.п} \Pi_{i э.п},$$

где  $b_{\text{з.п}}$  – число наименований и типоразмеров электродной проволоки;  $q_{i \text{ з.п}}$  – масса наплавленного металла электродной проволокой  $i$ -го наименования и типоразмера;  $\Pi_{i \text{ з.п}}$  – цена за единицу массы (1 кг) электродной проволоки  $i$ -го наименования и типоразмера по действующим прейскурантам оптовых цен с учетом затрат на ее приобретение;

$$C_{\text{пр.м}} = \sum_1^{b_{\text{пр.м}}} q_{i \text{ пр.м}} \Pi_{i \text{ пр.м}},$$

где  $b_{\text{пр.м}}$  – число наименований и типоразмеров присадочной проволоки (материала);  $q_{i \text{ пр.м}}$  – расход присадочной проволоки  $i$ -го наименования и типоразмера, кг;  $\Pi_{i \text{ пр.м}}$  – цена за единицу массы (за 1 кг) присадочной проволоки (материала)  $i$ -го наименования и типоразмера по прейскурантам оптовых цен с учетом затрат на ее приобретение;

$$C_r = \sum_1^{b_r} q_{i_r} \Pi_{i_r},$$

где  $b_r$  – количество видов газа, используемых при изготовлении сварной детали (узла);  $q_{i_r}$  – расход  $i$ -го газа данного вида на сварную деталь (узел); при газовой сварке и резке его определяют исходя из технологических режимов и норм расхода;  $\Pi_{i_r}$  – цена за единицу газа  $i$ -го вида (ее принимают по действующим прейскурантам оптовых цен с учетом затрат на приобретение газа);

$$C_{\text{эл.м}} = \sum_1^{b_{\text{эл.м}}} q_{i \text{ эл.м}} \Pi_{i \text{ эл.м}},$$

где  $b_{\text{эл.м}}$  – число наименований электродных материалов, потребляемых при сварке деталей (узла);  $q_{i \text{ эл.м}}$  – расход электродного материала  $i$ -го наименования, г на 1000 стыков, точек или метров шва;  $\Pi_{i \text{ эл.м}}$  – цена за единицу массы электродного материала  $i$ -го наименования по действующим прейскурантам оптовых цен с учетом затрат на их приобретение;

$$C_\phi = \sum_1^{b_\phi} q_{i \phi} \Pi_{i \phi},$$

где  $b_\phi$  – число наименований марок флюсов;  $q_{i \phi}$  – масса израсходованного флюса  $i$ -й марки;

$\Pi_{i \phi}$  – цена за единицу массы (1 кг) флюса  $i$ -й марки по действующим прейскурантам оптовых цен с учетом затрат на его приобретение.

Расход флюса для автоматической и механизированной дуговой сварки определяют исходя из количественного соотношения флюсов  $q_\phi$  и электродов  $q_3$ . Расход сжатого воздуха, охлаждающей воды и т.п. определяют по техническим характеристикам выбранного заготовительного, обрабатывающего и сварочного оборудования с учетом степени их загрузки.

Затраты на электроэнергию для технологических целей

$$C_{\text{э.т}} = \sum_1^b q_{i_3} \Pi_{i_3},$$

где  $b$  – число операций ТП (или число стыков элементов), для осуществления которых требуется электроэнергия;  $q_{i_3}$  – количество электроэнергии, израсходованной на 1 кг наплавленного металла при выполнении  $i$ -й операции (при сварке  $i$ -го стыка, детали и т.д.);  $\Pi_{i_3}$  – цена за единицу израсходованной электроэнергии по тарифам, утвержденным на электроэнергию.

Удельный расход электроэнергии (в  $\text{kVt} \cdot \text{ч}$ ) на 1 кг наплавленного металла при дуговых способах сварки

$$q'_3 = \frac{U_d}{\alpha_h \eta \beta_b},$$

где  $U_d$  – напряжение на дуге, В (задается режимами сварки);  $\alpha_h$  – коэффициент наплавки,  $\text{г}/(\text{A} \cdot \text{ч})$  (приводится в паспорте электродного материала);  $\eta$  – КПД установки;  $\beta_b$  – коэффициент, учитывающий время горения дуги в общем времени сварки.

Расход электроэнергии на сварку 100 точек (серийными машинами)

$$q_{\text{э.точ}} = \frac{M_{\text{ном}} \cos \phi U_{\text{cb}}^2}{36 U_h^2} t_b,$$

где  $M_{\text{ном}}$  – номинальная мощность,  $\text{kV} \cdot \text{A}$ ;  $U_{\text{cb}}^2$  – вторичное напряжение холостого хода ступени, принятой для сварки, В;  $U_h^2$  – вторичное напряжение холостого хода на номинальной ступени (предпоследней), В;  $\cos \phi$  – коэффициент мощности всей машины; для стационарных машин переменного тока типа

МТП его можно принимать равным 0,45...0,55, а для подвесных машин типа МТПГ 0,75...0,85;  $t_b$  – время включения машины при сварке 1000 точек.

Расход электроэнергии при шовной сварке ( $\text{kVt} \cdot \text{ч}/\text{м}$ )

$$q_{\text{э.в}} = \frac{M_{\text{ном}} \cos \varphi U_{\text{св}}^2}{60vU_{\text{н}}} \beta_b ,$$

где  $\cos \varphi = 0,60...0,70$  для машин типа МТП;  $\beta_b = 0,5$  – при сварке низкоуглеродистых сталей;  $v$  – линейная скорость сварки.

Расход электроэнергии при стыковой сварке оплавлением стальных деталей на серийных машинах ( $\text{kVt} \cdot \text{ч}$  на стык)

$$q_{\text{э.ст}} = F_{\text{св}} \Pi_{\text{опл}} \alpha_j ,$$

где  $F_{\text{св}}$  – площадь сечения свариваемых деталей,  $\text{cm}^2$ ;  $\Pi_{\text{опл}}$  – суммарный припуск на оплавление,  $\text{см}$ ;  $\alpha_j = 0,012...0,016$  – коэффициент.

Заработка плата производственных рабочих, занятых изготовлением сварных конструкций при применении сравниваемых вариантов ТП,

$$\begin{aligned} Z_{\text{n.p.}} &= \sum_1^m Z_{\text{o.i}} + Z_{\text{d.i}} + O_{\text{соц.i}} = \\ &= \sum_1^m r_{\text{cp.i}} t_i \left( 1 + \frac{k_d}{100} \right) + \left[ r_{\text{cp.i}} t_i \left( 1 + \frac{k_d}{100} \right) \right] \frac{k_{\text{отч}}}{100} , \end{aligned}$$

где  $m$  – число операций, составляющих ТП;  $Z_{\text{o.i}}$  – основная заработка плата (по тарифу) производственных рабочих, выполняющих  $i$ -ю операцию;  $Z_{\text{d.i}}$  – дополнительная заработка плата, приходящаяся на  $i$ -ю операцию;  $O_{\text{соц.i}}$  – отчисления в фонд социального страхования, приходящиеся на  $i$ -ю операцию;  $r_{\text{cp.i}}$  – средняя часовая тарифная ставка производственных рабочих, выполняющих  $i$ -ю операцию бригадой из двух-трех рабочих и более разных разрядов; за  $r_{\text{cp.i}}$  принимают средневзвешенную величину часовых тарифных ставок;  $t_i$  – норма времени на  $i$ -ю операцию;  $k_d \approx 15...20$  процент, который составляет дополнительная заработка плата от основной заработной платы;  $k_{\text{отч}} \approx 37...39$  – процент, который составляют отчисления в фонд социального страхования от суммы основной и дополнительной заработной платы.

Затраты на топливо для технологических целей (на нагрев, термическую обработку и т.д.)

$$C_{\text{т.т.}} = \sum_1^m q_{\text{т.i}} \Pi_{\text{т.}} ,$$

где  $m$  – число операций ТП, выполнение которых связано с затратами топлива;  $q_i$  – расход топлива на деталь (узел, изделие) при выполнении  $i$ -й операции;  $\Pi_{\text{т.}}$  – цена на топливо (мазут, природный газ по прейскурантам оптовых цен с учетом транспортно-заготовительных расходов);

$$q_{\text{т.i}} = q_{\text{час.i}} k_{\text{н.ср}} k_{\text{пот.}}$$

где  $q_{\text{час.i}}$  – среднечасовой расход топлива при выполнении  $i$ -й операции;  $k_{\text{н.ср}}$  – коэффициент, учитывающий среднюю неравномерность загрузки печи;  $k_{\text{пот.}}$  – коэффициент, учитывающий потери топлива.

Общезаводские расходы

$$P_{\text{цех}} = \sum_1^m \Psi_{\text{т.n}} k_{\text{п.б}} t_n k_{\text{цех}} ,$$

где  $m$  – число операций в ТП;  $\Psi_{\text{т.n}}$  – часовая тарифная ставка основных производственных рабочих, занятых выполнением  $n$ -й операции;  $k_{\text{п.б}}$  – коэффициент, учитывающий число рабочих в бригаде, выполняющих  $n$ -ю операцию;  $t_n$  – норма времени на  $n$ -ю операцию;  $k_{\text{цех}} \approx 0,8$  – коэффициент, учитывающий соотношение общезаводских расходов и основной заработной платы основных производственных рабочих.

Общая сумма затрат на изготовление сварной конструкции при применении каждого из сравниваемых ТП

$$C_{\text{с.к.}} = C_m + C_{\text{всп.m}} + Z_{\text{n.p.}} + C_{\text{т.т.}} + C_{\text{обор}} + P_{\text{цех.}}$$

Планируемое (фактическое) снижение себестоимости от внедрения новой технологии (механизации и автоматизации)

$$\Delta C_i = (C_{\text{пр}} - C_i) N_{\text{г.i}}$$

где  $\Delta C_i$  – планируемое снижение себестоимости (прирост прибыли) в  $i$ -м году, р.;  $C_i$ ,  $C_{\text{пр}}$  – соответственно себестоимости изготовления единицы сварной конструкции (узла, детали, заготовки) в  $i$ -м планируемом году и году, предшествующем внедрению новой технологии (механизации и автоматизации), р.;  $N_{\text{г.i}}$  – объем производства в  $i$ -м планируемом году, в натуральных единицах.

Условие целесообразности применения разработанного ТП в сравнении с базовым

$$V_{\text{раз}} N_r + f_{\text{раз}} \leq V_{\text{баз}} N_r + f_{\text{баз}},$$

где  $V_{\text{раз}}$ ,  $V_{\text{баз}}$  – переменные затраты на единицу продукции по сравниваемым вариантам;  $f_{\text{раз}}$ ,  $f_{\text{баз}}$  – условно-постоянные расходы по сравниваемым вариантам;  $N_r$  – годовое программное задание.

Программное задание, при котором сравниваемые варианты ТП одинаково экономичны,

$$N_{0,3} = \frac{f_{\text{раз}} - f_{\text{баз}}}{V_{\text{баз}} - V_{\text{раз}}}.$$

Если при  $N > N_{0,3}$  себестоимость годового выпуска  $C_r = vN + f$  при базовом варианте увеличивается на большую величину, чем при разработанном варианте, то применение последнего более целесообразно; и, наоборот, при  $N < N_{0,3}$  более предпочтительно применение существующего (базового) варианта.

При  $N_{\text{год.раз}} > N_{\text{год.баз}}$  корректирование производится по формулам

$$P_{\text{уд.раз}} = \frac{P_{\text{год.баз}}}{N_{\text{год.раз}}}$$

или

$$P_{\text{уд.раз}} = P_{\text{уд.баз}} \frac{N_{\text{год.баз}}}{N_{\text{год.раз}}} = \frac{P_{\text{уд.баз}}}{k_{\text{изм}}},$$

где  $P_{\text{уд.раз}}$ ,  $P_{\text{уд.баз}}$  – удельная величина условно-постоянных накладных расходов по разработанному и базовому вариантам соответственно;  $P_{\text{год.баз}}$  – сумма годовых условно-постоянных накладных расходов по базовому варианту;  $N_{\text{год.раз}}$ ,  $N_{\text{год.баз}}$  – годовой объем производства по разработанному и базовому вариантам соответственно.

Коэффициент изменения объема производства

$$k_{\text{изм}} = \frac{N_{\text{год.раз}}}{N_{\text{год.баз}}}.$$

Скорректированная себестоимость сварной конструкции по базовому варианту ТП

$$C_{\text{кор.баз}} = C_{\text{баз.пр}} \frac{N_{\text{год.раз}}}{N_{\text{год.баз}}} + \\ + (C_{\text{баз.н}} + \Delta C_{\text{баз.н}}) P_{\text{год.баз}},$$

где  $C_{\text{баз.пр}}$ ,  $C_{\text{баз.н}}$  – годовые текущие расходы по базовому варианту, изменяющиеся соответственно пропорционально и непропорционально объему производства;  $\Delta C_{\text{баз.н}}$  – увеличение затрат при росте объема производства;  $P_{\text{год.баз}}$  – условно-постоянные накладные расходы по базовому варианту.

Годовая экономия и экономический эффект от применения разработанного варианта ТП

$$\mathcal{E}_r = (C_{\text{ед.баз}} - C_{\text{ед.раз}}) N_{\text{год.раз}},$$

где  $C_{\text{ед.баз}}$ ,  $C_{\text{ед.раз}}$  – себестоимость единицы сварной конструкции (узла, детали, заготовки) по базовому и разработанному вариантам ТП соответственно;

$$C_{\text{пп}} = C + E_h K$$

или

$$C_{\text{пп}} = T_h C + K,$$

где  $C_{\text{пп}}$  – приведенные затраты, р.;  $C$  – себестоимость продукции по данному варианту, р./год;  $K$  – единовременные капитальные вложения по тому же варианту, р.;  $T_h$ ,  $E_h$  – нормативные значения срока окупаемости единовременных капитальных вложений ( $T_{\text{ок}}$ ) и коэффициента сравнительной экономической эффективности по разработанному варианту ( $E$ );

$$\mathcal{E}_r = (C_{\text{баз}} + E_h K_{\text{ед.баз}}) - (C_{\text{раз}} + E_h K_{\text{ед.раз}}),$$

где  $C_{\text{баз}}$ ,  $C_{\text{раз}}$  – себестоимости продукции соответственно по базовому и разработанному вариантам технологии, р./год;  $K_{\text{ед.баз}}$ ,  $K_{\text{ед.раз}}$  – единовременные капитальные вложения соответственно по базовому и разработанному вариантам технологии, р.;

$$\mathcal{E}_{r,\text{уд}} = [(C_{\text{ед.баз}} + E_h K_{\text{ед.баз}}) - \\ - (C_{\text{ед.раз}} + E_h K_{\text{ед.раз}})] N_{\text{год.раз}},$$

где  $\mathcal{E}_{r,\text{уд}}$  – годовой экономический эффект при использовании удельных показателей себестоимости продукции и единовременных капитальных вложений;  $C_{\text{ед.баз}}$ ,  $C_{\text{ед.раз}}$  – себестоимость единицы продукции по базовому и разработанному варианту ТП соответственно;  $K_{\text{ед.баз}}$ ,  $K_{\text{ед.раз}}$  – удельные капитальные вложения на единицу продукции по базовому и разработанному ТП соответственно.

Срок окупаемости единовременных капитальных вложений

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{раз}} - K_{\text{баз}}}{C_{\text{баз}} - C_{\text{раз}}} \leq T_{\text{н}}.$$

Коэффициент сравнительной экономической эффективности

$$E = \frac{C_{\text{баз}} - C_{\text{раз}}}{K_{\text{раз}} - K_{\text{баз}}} \leq E_{\text{н}}.$$

Нормативный срок окупаемости  $T_{\text{н}}$  принимают равным 6,6 года, а нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности  $E_{\text{н}}$  – равным 0,15 (при высоких темпах развития ТП сварки  $T_{\text{н}}$  принимают равным 3 годам и  $E_{\text{н}} \approx 0,33$ ).

### 17.9. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ, ЗАТРАТАМ И ПРИБЫЛИ

**Выбор сравниваемых вариантов.** Для получения достоверных результатов (характеристик и показателей) при сравнительном анализе необходимо выделить совокупность специально отобранных вариантов конструкторско-технологических, технико-организационных разработок (других прогрессивных мероприятий, далее – мероприятий НТП) из числа потенциально возможных, каждый из которых в достаточной мере удовлетворяет социальным и экологическим требованиям и характеризуется технико-экономическими показателями, соответствующими прогрессивным отечественным, мировым достижениям или превосходящими их.

Если при расчете экономического эффекта от внедрения новых разработок (мероприятий НТП) в действующее производство сравниваемым (базовым) вариантом чаще всего являются применяемые на заводе машина, оборудование, технология и т.д., то при данном методе состав сравниваемых вариантов по годам расчетного периода изменяется в связи с появлением все новых и новых инженерных решений.

При сравнении вариантов необходимо:

- оценивать эффективность по условиям использования продукции с учетом сопутствующих позитивных и негативных (если они есть) результатов в социальной, экологической и внешнеэкономической сферах;
- определять эффективность по всему циклу разработки и реализации продукции

(НИОКР, освоение, серийное производство, использование результатов);

- исходить в расчетах из обоснованных экономических нормативов; единого по народному хозяйству норматива эффективности капитальных затрат и дифференцированных нормативов – платы за трудовые и природные ресурсы, тарифов, сметной стоимости, цен (действующих и перспективных), характеризующих качество и эффективность продукции для потребителя;

- учитывать экономическую неравноточность затрат и результатов за различные периоды времени и приводить их к единому расчетному году, умножая указанные величины за каждый год на коэффициент приведения (табл. 17.1);

- рассчитывать экономический эффект по условиям использования продукции (производственно-технологического и научно-технического назначения) до установления на нее цены, так как величина эффекта влияет на цены и учитывается при их расчете;

- определять экономический эффект от улучшения качества продукции (в условиях использования) по ценам, отражающим изменение эффективности использования ее у последующих потребителей;

- рассчитывать экономический эффект по условиям производства продукции с использованием следующих данных:

- действующих оптовых и розничных цен, тарифов на продукцию и услуги;
- нормативов платы за производственные фонды, трудовые, природные и другие ресурсы (утвержденные действующим законодательством);

- действующих нормативов отчислений от прибыли предприятий (объединений) в государственный и местные бюджеты, вышестоящим организациям для формирования централизованных отраслевых фондов и резервов;

- нормативов расчета предприятий (объединений) с банком за предоставленный кредит или хранение собственных средств;

- нормативов пересчета валютной выручки.

По каждому из числа отобранных (допустимых) вариантов определяют (с учетом динамики) затраты, результаты и экономический эффект. Экономический эффект от использования конструкторско-технологических и технико-организационных разработок (мероприятий НТП) за расчетный период  $T(\mathcal{E}_t)$  рассчитывают по формуле

17.1. Таблица коэффициентов приведения

Число лет, предшествующих расчетному году	$\alpha_t$	Число лет, следующих за расчетным годом	$\alpha_t$	Число лет, следующих за расчетным годом	$\alpha_t$
10	2,5937	1	0,9091	11	0,3505
9	2,3579	2	0,8264	12	0,3186
8	2,1436	3	0,7513	13	0,2897
7	1,9487	4	0,6830	14	0,2633
6	1,7716	5	0,6209	15	0,2394
5	1,6105	6	0,5645	20	0,1486
4	1,4641	7	0,5132	25	0,0923
3	1,3310	8	0,4665	30	0,0573
2	1,2100	9	0,4241	40	0,0221
1	1,1000	10	0,3855	50	0,0085
0	1,0000				

$$\mathcal{E}_t = P_t - Z_t,$$

где  $P_t$  – стоимостная оценка результатов использования инженерных разработок (мероприятий НТП) за расчетный период;  $Z_t$  – стоимостная оценка затрат на их реализацию за тот же период.

Экономические эффекты от разработанного варианта  $\mathcal{E}_{t,p}$  и лучшего из числа отобранных для сравнения  $\mathcal{E}_{t,c}$  соответственно равны

$$\mathcal{E}_{t,p} = P_{t,p} - Z_{t,p}; \quad \mathcal{E}_{t,c} = P_{t,c} - Z_{t,c}.$$

Разработанный вариант экономически целесообразен, если

$$\mathcal{E}_{t,p} \rightarrow \max \text{ или } \mathcal{E}_{t,p} = \mathcal{E}_{t,c} \text{ при } Z_{t,p} < Z_{t,c}.$$

**Стоймостная оценка результатов.** Стоймостная оценка достигнутых результатов за расчетный период  $T(P_t)$  проводится по формуле

$$P_t = \sum_{t_h}^{t_k} P_t \alpha_t,$$

где  $P_t$  – стоимостная оценка результатов в году  $t$ -го расчетного периода;  $t_h$  – начальный год расчетного периода, год начала финансирования работ, включая НИР;  $t_k$  – конечный год расчетного периода, год завершения жизненно-

го цикла машины, технологии и т.п., определяемый плановыми (нормативными) сроками обновления продукции по условиям ее производства и использования или сроками службы машин, оборудования и других средств труда (с учетом морального старения);  $\alpha_t$  – коэффициент приведения (см. табл. 17.1) разновременных затрат и результатов всех лет периода реализации машины, технологии к расчетному году  $t_p$ , который, как правило, является наиболее ранним из всех рассматриваемых календарным годом, предшествующим началу выпуска продукции или использования в производстве новой технологии, новых методов организации труда и производства.

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t},$$

где  $E_n$  – норматив приведения разновременных затрат и результатов, численно равный нормативу эффективности капитальных затрат ( $E_n = 0,1$ );  $t_p$  – расчетный год;  $t$  – год, затраты в результаты которого приводят к расчетному году.

Стоймостную оценку результатов определяют суммированием основных  $P_{o,t}$  и сопутствующих  $P_{c,t}$  результатов.

Для новых материалов, заготовок и других предметов труда  $P_{o,t}$  определяют по формуле

$$P_{o,t} = N_{t,p} \Pi_t / \alpha_t,$$

где  $N_{t,п}$  – объем применения новых предметов труда в  $t$ -м году;  $\alpha_t$  – расход предметов труда на единицу продукции, производимой с их использованием в  $t$ -м году;  $\Pi_t$  – цена единицы продукции (с учетом эффективности ее применения), выпускаемой с использованием нового предмета труда в  $t$ -м году.

Для машин, оборудования и других средств труда длительного пользования  $P_{o,t}$ , определяют по формуле

$$P_{o,t} = \Pi_t N_{t,c} B_t,$$

где  $\Pi_t$  – цена единицы продукции (с учетом эффективности ее применения), производимой с помощью новых средств труда в  $t$ -м году;  $N_{t,c}$  – объем применения новых средств труда в  $t$ -м году;  $B_t$  – производительность машин, оборудования и других средств труда в  $t$ -м году.

Сопутствующие результаты – это дополнительная экономия в разных сферах народного хозяйства, а также экономия от социальных и экологических мероприятий НТП.

**Социальные и экологические результаты.** Стоимостную оценку этих результатов в  $t$ -м году  $P_{c,e,t}$ , проводят по формуле

$$P_{c,e,t} = \sum_{j=1}^n P_{jt} a_{jt},$$

где  $P_{jt}$  – величина отдельного результата в натуральном выражении с учетом масштаба его внедрения в  $t$ -м году;  $a_{jt}$  – стоимостная оценка единицы отдельного результата в  $t$ -м году;  $n$  – число показателей, учитываемых при определении воздействия мероприятия НТП на окружающую среду и социальную сферу.

**Затраты на реализацию мероприятий НТП.** Речь идет о затратах при производстве разработанных конструкций машин, оборудования, при внедрении технологии и т.д.  $Z_{п.t}$ , а также при их использовании (без учета затрат на приобретение)  $Z_{и.t}$  за расчетный период  $T$ .

$$Z_t = Z_{п.t} + Z_{и.t},$$

где  $Z_t$  – затраты на реализацию мероприятий НТП; величины  $Z_{п.t}$  и  $Z_{и.t}$  рассчитывают по однотипной формуле:

$$\begin{aligned} Z_{п.t}(Z_{и.t}) &= \sum_{t_n}^{t_k} Z_{п.t}(Z_{и.t}) \alpha_t = \\ &= \sum_{t_n}^{t_k} (I_t + Z_{ед.t} - C_{ост.t}) \alpha_t, \end{aligned}$$

где  $Z_{п.t}(Z_{и.t})$  – затраты всех ресурсов в  $t$ -м году, включая затраты на получение сопутствующих результатов;  $I_t$  – текущие издержки при производстве (использовании) машин, оборудования и т.д. в  $t$ -м году без учета амортизационных отчислений на реновации;  $Z_{ед.t}$  – единовременные затраты при производстве (использовании) машин, оборудования и т.д. в  $t$ -м году;  $C_{ост.t}$  – остаточная стоимость (ликвидационное сальдо) основных фондов, выбывших в  $t$ -м году. Если на конец расчетного периода остаются основные фонды для дальнейшего использования в течение ряда лет, тогда величину  $C_{ост.t}$  определяют как остаточную стоимость указанных фондов.

**Экономический эффект и прибыль.** Экономический эффект от реализации конструкторско-технологических, технико-организационных разработок (других мероприятий НТП) при стабильных объемах производства, показателях качества, затратах и результатах по годам расчетного периода  $\mathcal{E}_{t,c}$  определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{t,c} = (P_{r,c} - Z_{r,c}) / (K_p + E_h),$$

где  $P_{r,c}$  – неизменная по годам расчетного периода стоимостная оценка результатов (основных и сопутствующих) от применения конструкторско-технологических и других мероприятий НТП;  $Z_{r,c}$  – неизменные по годам расчетного периода затраты на реализацию указанных мероприятий,

$$Z_{r,c} = I_r + (K_p + E_h) Z_{ед},$$

где  $I_r$  – годовые текущие издержки при использовании разработанных конструкций машин, оборудования и т.д. (без учета амортизационных отчислений на реновацию);  $K_p$  – норма (коэффициент) реновации основных фондов при использовании машин, оборудования и т.д., определяемая с учетом фактора времени (табл. 17.2);

17.2. Таблица коэффициентов реновации основных фондов

$t_{\text{сл}}$	$K_p$	$t_{\text{сл}}$	$K_p$	$t_{\text{сл}}$	$K_p$	$t_{\text{сл}}$	$K_p$
1	1,000	6	0,1296	11	0,0540	20	0,0175
2	0,427	7	0,1054	12	0,0468	25	0,0102
3	0,3021	8	0,0874	13	0,0408	30	0,0061
4	0,2155	9	0,0736	14	0,0357	40	0,00226
5	0,1638	10	0,0627	15	0,0315	50	0,00086

$$K_p = E_h / [(1 + E_h)^{t_{\text{сл}} - 1}],$$

$$\Delta \Pi = \Pi_t - \Pi_o,$$

где  $t_{\text{сл}}$  – срок службы средств и орудий труда (техники) долговременного применения;  $Z_{\text{ед}}$  – единовременные затраты при использовании разработанных машин, оборудования и т.д. (при распределении во времени их приводят по фактору времени к расчетному году).

Прибыль, остающуюся в распоряжении предприятия (научной организации) в  $t$ -м году,  $\Pi_t$ , определяют по формуле

$$\Pi_t = P_t - C_t - H_t,$$

где  $P_t$  – выручка от реализации продукции производственно-технического (научно-технического) назначения в  $t$ -м году по ценам, установленным в централизованном или договорном порядке;  $C_t$  – стоимость продукции в  $t$ -м году;  $H_t$  – общая сумма налогов и выплат из балансовой прибыли: платежи за трудовые и природные ресурсы, производственные фонды и кредиты, отчисления в государственный бюджет и вышестоящим организациям в  $t$ -м году.

Финансовые средства предприятия, идущие на формирование фондов экономического стимулирования, включают в себя помимо прибыли  $\Pi_t$  и амортизационные отчисления, оставшиеся в его распоряжении.

Прибыль по данной конструкторско-технологической разработке (мероприятию НТП), выделенная из общей величины прибыли, остающейся у предприятия  $\Delta \Pi$ , равна

где  $\Pi_o$ ,  $\Pi_t$  – общая величина прибыли, остающаяся у предприятия до и после реализации разработки (мероприятия НТП).

Экономический эффект единовременных затрат, финансируемых предприятием из собственных или заемных источников по данной конструкторско-технологической разработке (мероприятию НТП), оценивают по следующим показателям:

– коэффициенту эффективности единовременных затрат  $e$ , определяемому из соотношения

$$\sum_{t=1}^{t_k} (\Pi_t - I_t - Z_{\text{ед}, t}) (1 + e)^{t_p - t} = 0$$

(величину  $e$  сравнивают с нормативом  $E_h$ , при этом необходимо выполнение условия  $e \geq E_h$ );

– периоду возврата единовременных затрат, определяемому последовательным сложением величин  $(\Pi_t - I_t)$   $a_t$  до момента, пока получаемая сумма не будет равна величине единовременных затрат, приведенных к расчетному году. Срок возврата сопоставляется с продолжительностью расчетного периода.

При формировании плана экономического и социального развития расчет экономического эффекта разработчиком совместно с изготовителем согласовывается с основным потребителем-заказчиком. Разногласия между сторонами по расчету экономического эффекта рассматриваются вышестоящими организациями или они разрешаются в установленном порядке.

## 17.10. ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ РАБОТ

### 17.10.1. НОРМЫ ТРУДА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В задачи нормирования труда (работ) входит установление необходимых затрат и результатов труда, а также оптимальных соотношений между численностью работников различных групп и количеством единиц оборудования. Нормирование труда является основой планирования и организации сварочного производства, оплаты труда, стимулирования роста производительности труда и эффективности производства сварных конструкций, основой управления производственными процессами.

Система норм труда характеризует различные стороны трудовой деятельности работников, поэтому охватывает нормы времени, выработка, обслуживания, численности, управляемости и нормированные задания.

*Нормы времени* (трудоемкость операции) – необходимые затраты времени одного работника или бригады на выполнение единицы работы (продукции), человекоминуты (человекочасы).

*Нормы выработки* – количество единиц продукции определенного вида, которое должно быть изготовлено одним работником или бригадой за данный отрезок времени (час, смену) в натуральном выражении (штуках сварных деталей, метрах шва, массе наплавленного металла и т.д.).

*Норма обслуживания* – требуемое количество оборудования, рабочих мест, единиц производственной площади и других производственных объектов, закрепленных для обслуживания за одним работником или бригадой.

*Норма численности* – численность работников, необходимых для выполнения запланированного объема сварочных работ или обслуживания одного или нескольких автоматов (агрегатов, единиц оборудования).

*Норма управляемости* – число работников, которое должно быть непосредственно подчинено одному руководителю.

*Нормированное задание* – необходимый ассортимент и объем работ, которые должны быть выполнены одним работником или бригадой за определенное планируемое время (смену, сутки, месяц). Оно характеризует, как и норма выработки, результаты деятельности работников. Однако в данном случае результаты исчисляются не только в натуральном вы-

ражении, но и в нормочасах, норморублях. Этим отличается нормированное задание от нормы выработки. Перечисленные виды норм устанавливают исходя из необходимых затрат времени на выполнение операций, ТП, различных видов работ и входящих в них элементов. В связи с этим высокие требования предъявляются к качеству норм труда – к точности и достоверности установленных затрат рабочего времени: подготовительно-заключительного  $t_{п.з}$ , основного  $t_0$ , вспомогательного  $t_{в.н}$ , оперативного  $t_{опер}$ , обслуживания рабочего места  $t_{обсл}$ , на отдых и личные надобности (регламентированные перерывы в работе)  $t_n$ .

Особенность  $t_{п.з}$  состоит в том, что оно определяется на весь объем работ (на всю обрабатываемую партию). В массовом и крупносерийном производстве  $t_{п.з}$  в норме штучного времени  $t_{шт}$  весьма мало и поэтому не учитывается:

$$t_{шт} = t_0 + t_{в.н} + t_{обсл} + t_n,$$

или

$$t_{шт} = t_{опер} \left( 1 + \frac{a + b}{100} \right),$$

где  $t_{в.н}$  – вспомогательное время, не перекрываемое машинным;  $a, b$  – соответственно проценты, которые составляют  $t_{обсл}$  и  $t_n$ , от оперативного времени, определяемого по формуле

$$t_{опер} = t_0 + t_{в.н}.$$

В единичном и серийном производстве сварных конструкций из-за частых переналадок оборудования в результате широкой и переменной их номенклатуры  $t_{п.з}$  составляет значительную величину и учитывается в норме времени, называемой штучно-калькуляционным:

$$t_{шт.к} = t_{шт} + (t_{п.з} / n),$$

где  $n$  – число сварных деталей (заготовок) в партии или число стыков, участков шва, приходящихся на партию сварных элементов.

Норма времени на партию

$$t_{пар} = t_{шт} n + t_{п.з}.$$

В серийном производстве

$$t_{пар} = t_{шт.к} n + t_{п.з}.$$

В единичном и мелкосерийном сварочном производстве величина  $t_{п.з}$  особенно велика (20...10 % времени смены), поэтому в этих

условиях она часто нормируется в минутах на смену, а в норму времени включается через коэффициент подготовительно-заключительного времени  $k_{\text{п.з}}$ :

$$k_{\text{п.з}} = 1 - [(F_{\text{см}} - t_{\text{п.з}}) / F_{\text{см}}];$$

$$t_{\text{шт.к}} = t_{\text{шт}} k_{\text{п.з}} = t_{\text{шт}} \left( 1 - \frac{F_{\text{см}} - t_{\text{п.з}}}{F_{\text{см}}} \right),$$

где  $F_{\text{см}}$  – рабочее время за смену (ее продолжительность 492 мин).

Величина  $t_{\text{п.з}}$  для повторяющихся сварочных работ устанавливается по нормативам, а для оригинальных – на основе данных фотографии рабочего дня. Основными путями уменьшения  $t_{\text{п.з}}$  являются:

- совмещение времени выполнения части подготовительно-заключительных работ с протеканием основного машинного времени;
- централизация доставки на рабочее место материалов, приспособлений, средств механизации и автоматизации и т.д. до начала работ;
- наладка, подналадка и перенастройка оборудования в обеденные и межсменные перерывы.

*Основное (технологическое) время* рассчитывают с учетом: целевого назначения и характера операций (ТП), вида оборудования, режимов его работы и паспортных данных по приведенным ниже формулам с использованием нормативов времени.

*Вспомогательное время*, затрачиваемое на установку, закрепление, раскрепление и снятие заготовок (деталей, узлов), управление оборудованием, изменение режимов его работы, контроль за ходом ТП и качеством продукции, нормируют по нормативам; при их отсутствии – путем изучения фактических затрат времени на рабочем месте методом хронометража. В том и другом случаях необходимо уменьшать долю  $t_b$  в структуре  $t_{\text{опер}}$ . Сказанное особо важно при скоростных режимах работы оборудования, обуславливающих резкое сокращение машинного времени  $t_m$ . При этом  $t_b$  остается без изменения или уменьшается незначительно. Важным также является увеличение в структуре  $t_b$  перекрываемого вспомогательного времени  $t_{b,n}$ ; должно быть соблюдено условие:  $t_b < t_{b,n}$ .

В зависимости от типа производства  $t_b$  устанавливается: в единичном и мелкосерийном производстве на типовую технологию сварки (сборки-сварки) отдельных изделий; в серийном производстве – на комплекс приемов (переход), обрабатываемую поверхность; в массовом производстве – на единицу изделия, одну операцию, в с, мин, ч.

*Время обслуживания рабочего места* определяется по нормативам или фотографии рабочего дня. Величина  $t_{\text{обс}}$  зависит прежде всего от производственных условий, систем обслуживания рабочих мест, уровня механизации и автоматизации. В единичном и серийном производстве  $t_{\text{обс}}$  укрупненно выражается формулой

$$t_{\text{обс}} = at_{\text{опер}} / 100.$$

В массовом и крупносерийном производстве определяют время технического  $t_{\text{обс.тех}}$  и организационного обслуживания  $t_{\text{обс.орг}}$  рабочего места по формулам:

$$t_{\text{обс.тех}} = bt_o / 100;$$

$$t_{\text{обс.орг}} = vt_{\text{опер}} / 100,$$

где а, б, в – соответственно проценты, которые составляют время обслуживания рабочего места от  $t_{\text{опер}}$ , время технического его обслуживания от  $t_o$  и организационного от  $t_{\text{опер}}$ .

При определении указанного времени необходимо выделять перекрываемое  $t_{\text{обс.п}}$  и неперекрываемое время  $t_{\text{обс.н}}$ , так как в норму времени включается только  $t_{\text{обс.н}}$ .

*Время на отдых и личные надобности (регламентированные перерывы)* укрупненно определяют в процентах от  $t_{\text{опер}}$ , причем время на личные надобности предусматривается нормативами в размере 20 % от  $t_{\text{опер}}$  или 10 мин на рабочую смену (табл. 17.3). В основу нормирования времени на отдых должна быть положена разработанная НИИ труда методика, согласно которой на работоспособность влияют следующие факторы: физические усилия, нервное напряжение, темп работы, рабочее положение, монотонность работы, температура, влажность, тепловое излучение в рабочей зоне, загрязненность воздуха, производственный шум, вибрация, толчки, освещение. По каждому из перечисленных и других факторов установлено время на отдых в процентах от  $t_{\text{опер}}$ .

### 17.3. Типовые режимы труда и отдыха при обеденном перерыве в середине смены

Работа	Перерыв	Отдых
Связанная с незначительными физическими усилиями и умеренным нервным напряжением	Два перерыва по 5 мин в течение смены: через 2 ч после начала работы и за 1,5 ч до ее окончания	Производственная гимнастика 2 раза в день
Связанная со средними физическими усилиями и средним нервным напряжением	Два перерыва по 10 мин в течение смены: через 2 ч после начала работы и за 1,5 ч до ее окончания	
Не требующая больших физических усилий, но неблагоприятная по монотонности, рабочей позе и темпу работы	Четыре перерыва по 5 мин в течение смены через каждые 1,5 ч работы	Производственная гимнастика 2 раза в день, остальные два перерыва для отдыха в удобной позе и при легкой разминке
Связанная с большими физическими усилиями и повышенным нервным напряжением	Три перерыва по 10 мин в течение смены	Отдых в спокойном состоянии или легкие разминочные упражнения
Требующая большого напряжения при высоком темпе и неблагоприятных условиях (загрязненность воздуха, вибрация)	Перерывы в течение каждого часа; из них первые два перерыва по 10 мин, остальные по 3...5 мин	Производственная гимнастика 2 раза в день и отдых в спокойном состоянии
Связанная с очень большими физическими усилиями в неблагоприятных условиях	Перерывы по 8...10 мин в течение смены или три перерыва в течение смены по 15...20 мин, из них два перерыва – во второй половине смены	Отдых в спокойном состоянии в специально отведенном для этого помещении
Выполняемая в неблагоприятных условиях при высоком темпе и повышенном нервном напряжении	Перерывы по 4...5 мин в течение каждого получаса	
Требующая больших физических усилий в особо неблагоприятных условиях	Перерывы по 12...15 мин в каждом рабочем часу	
Выполняемая при благоприятных условиях среды, но со значительным напряжением внимания	Три перерыва по 5 мин	Упражнения типа дыхательной гимнастики
Связанная со значительным умственным напряжением	Гимнастика, пятиминутные физкультурные паузы в первой и второй половинах рабочего дня	Упражнения, включающие работу всей мускулатуры

### 17.10.2. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ

Метод нормирования – совокупность определенных приемов установления норм труда. Наиболее характерны из них: анализ трудового процесса, проектирование рациональной технологии и организации труда, расчет норм. При выборе метода нормирования труда учитывают прежде всего характер нормируемых работ и условия их выполнения. Основным методом нормирования сварочных работ является аналитический метод, а именно: аналитически-расчетный, для которого базой определения норм служат нормативные материалы и математические зависимости (формулы). Этот метод нормирования применяют преимущественно в серийном и крупносерийном производстве. Более точным и объективным методом нормирования является аналитически-экспериментальный (исследовательский), для которого исходная информация, используемая при определении норм, получается с помощью хронометража и фотографии рабочего дня. Рассматриваемый метод нормирования связан с немалыми затратами времени и средств, поэтому применение его целесообразно в массовом и крупносерийном сварочном производстве.

В единичном и мелкосерийном производстве используют преимущественно опытно-статистический или сравнительно-расчетный метод. В этом случае сварочные работы (операции) делятся на укрупненные элементы, продолжительность выполнения которых сопоставляется с продолжительностью выполнения таких же элементов аналогичных работ и операций. Сравнение проводят по типовым нормам времени, статистическим данным, графикам и номограммам.

Из сказанного следует, что точность и прогрессивность норм труда, установленных с применением каждого из рассмотренных методов нормирования, предопределяются в равной мере, как совершенством способов расчета, так и новизной, достоверностью исходных обобщенных и справочных материалов (норм и нормативов). Они должны разрабатываться с учетом комплекса технических, экономических, психофизиологических, санитарно-гигиенических, социальных и правовых факторов. При анализе взаимосвязей затрат труда и рабочего времени с факторами, влияющими на их величину, к числу приоритетных факторов должны быть отнесены: параметры и режимы

ТП (операций), приемы и режимы труда, режимы работы оборудования, технического и организационного обслуживания его (рабочего места). Роль этих факторов резко возрастает в связи с переходом на интенсивный путь развития.

Исходным объектом нормирования при определении основного времени на сварку является обычно участок (1 м длины) прямолинейного шва, выполненного в горизонтальном положении изделия. Поэтому  $t_0$  должно уточняться в зависимости от вида, положения и протяженности швов изготавляемой сварной конструкции.

Для уточнения основного времени на сварку вводят поправочные коэффициенты  $k_n$  (табл. 17.4).

При расчете норм времени на электросварку часто применяют укрупненные нормативы, которые учитывают неполное время  $t_{шт.к}$  на сварку 1 м длины шва. Для расчета полного  $t_{шт.к.п}$  необходимо время, приводимое в таблицах нормативов, умножить на коэффициенты, учитывающие различные положения швов в пространстве, марки электродов, условия выполнения работы и вид свариваемого шва (табл. 17.5).

В условиях интенсификации сварочного производства резко повышаются требования к точности, технической обоснованности и прогрессивности норм времени на операции, ТП (работы), связанные с изготовлением сварных конструкций и входящих в них элементов. Эти требования в значительной мере выполнимы при автоматизации расчетов режимов и технических норм времени на сварочные операции.

Автоматизированная подсистема, будучи самостоятельным звеном АСУТП, предназначается для расчета режимов и технических норм времени на выполнение ручной электродуговой, механизированной, автоматической сварки; контактной точечной, шовной и других способов сварки.

Применение этой подсистемы позволяет успешно решать задачи повышения производительности труда и эффективности использования сварочного оборудования, рациональной организации оплаты труда, обеспечения достоверными исходными данными технико-экономического и оперативного планирования. Структура автоматизированной подсистемы по данным литературы может быть представлена в виде схемы (рис. 17.1).

#### 17.4. Значения поправочных коэффициентов

Характер отклонений от исходного объекта нормирования	$K_n$	Характер отклонений от исходного объекта нормирования	$K_n$
Положение сварных швов:		Сварка труб диаметром до 2 м:	
– нижнее	1	– неповоротныестыки:	
– вертикальное	1,25	вертикальные	1
– горизонтальное	1,3	горизонтальные	1,1
– потолочное	1,6	– поворотныестыки	0,85
Сварные швы с поворотом конструкции:		Сварка и резка:	
– продольные	1	– в стационарных условиях на сварочныхплощадках	1
– кольцевые	1,1	– непосредственно на монтаже (строительном участке) с переходом и перемещениями аппаратуры	
– кольцевые без поворота конструкции	1,35	– на подвесных устройствах (люльках)	1,1
Длина сварных швов, мм:		– с подмостей и лестниц	1,5
– 200...300	1,1	– в согнутом положении и при выполнении работ лежа	1,2
– <200	1,2		1,25

#### 17.5. Зависимость коэффициента от марки электрода

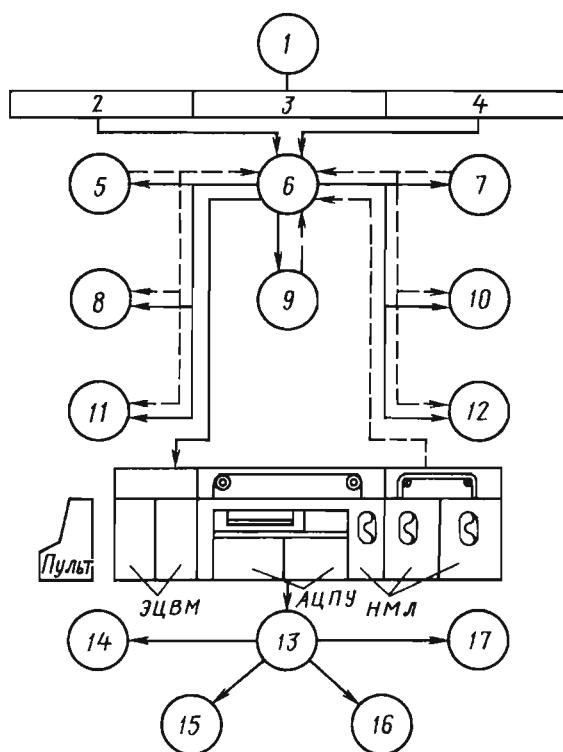
Электрод	Коэффициент	Электрод	Коэффициент
УОНИ-13	1	ЦМ-7	0,7
АН-1	1,14	ЦМ-7С	0,5
ОМА-2	1,33	ОЗЦ-4	1,11
ОЗЦ-1	1,45	ОЗС-2	1,37
ОММ-5	0,9	ВН-48	1,04

Управляющий и функциональные алгоритмы, информационные массивы и математическое обеспечение являются главными составными частями автоматизированной подсистемы расчета режимов и технических норм времени сварочных операций. На рис. 17.2 приведена в общем виде блок-схема управляющего алгоритма, который представляет собой директивное предписание о необходимости

сти выполнения комплекса вычислительных операций для решения поставленной задачи. В комплексной программе определения режимов и норм времени может быть поставлена задача: установить только параметры режима сварки. Алгоритм должен предусматривать возможность реализации такого задания.

Функциональные блоки являются алгоритмами определения отдельных этапов расчета режимов и норм времени сварочных работ. Такими блоками могут быть алгоритмы расчета основного времени на сварку, вспомогательного и штучного времени, площади наплавленного металла и т.д.

Информационные массивы – это формы представления и накопления нормативно-справочной информации для расчета режимов сварки и норм времени сварочных работ. Эти массивы подразделяются на постоянные (информация о паспортных данных оборудования, сварочных материалах, элементах разделки кромок, сварного шва) и переменные (нормативно-справочная информация по расчету режимов и техническим нормам времени сварочных операций).



**Рис. 17.1. Структура автоматизированной подсистемы технического нормирования сварочных операций:**

- 1 – исходные данные для расчетов на ЭВМ; 2 – 4 – соответственно данные о сварной конструкции, технологической операции, об условиях ее выполнения; 5 – массив информации о паспортных данных оборудования; 6 – управляющий алгоритм и функциональные блоки; 7 – массив информации об инструменте и приспособлении; 8 – то же, о сварочном материале; 9 – математическое обеспечение подсистемы; 10 – массив информации о нормативах режимов сварки; 11 – то же, о конструктивных элементах шва и разделки кромок; 12 – то же, для расчета норм времени; 13 – результаты расчета на ЭВМ; 14 – 17 – соответственно параметры режимов сварки, составляющие нормы времени, технологические карты, технико-нормировочные карты; ЭЦВМ – электронно-цифровая вычислительная машина; АЦПУ – аналого-цифровое печатающее устройство; НМЛ – накопители на магнитных лентах

Математическое обеспечение – это совокупность (библиотека) стандартных программ, предназначенных для реализации отдельных блоков и работы с данными из массивов. Здесь применена блочная методика построения алгоритмов, состоящих из ряда отдельных частных блоков. Каждому способу сварки присуще множество блоков (выполненных на переход, операцию). Блоки реализуются в определенной последовательности. Каждый блок служит для расчета соответствующего параметра: числа проходов, силы сварочного тока, диаметров электродов, скорости сварки, площади наплавленного металла и т.д. (всего на электродугово-

ую ручную сварку предусмотрено 16 блоков). Блочный метод построения алгоритмов обладает следующими преимуществами:

- простотой построения управляющих алгоритмов решения отдельных задач;
- возможностью использования одних и тех же блоков для решения различных функциональных задач, внесения дополнений или корректировок в какие-либо программы;
- сравнительно короткими сроками программирования и отладки программ;
- значительной эффективностью, при адаптации программы к конкретным условиям сварочного производства.

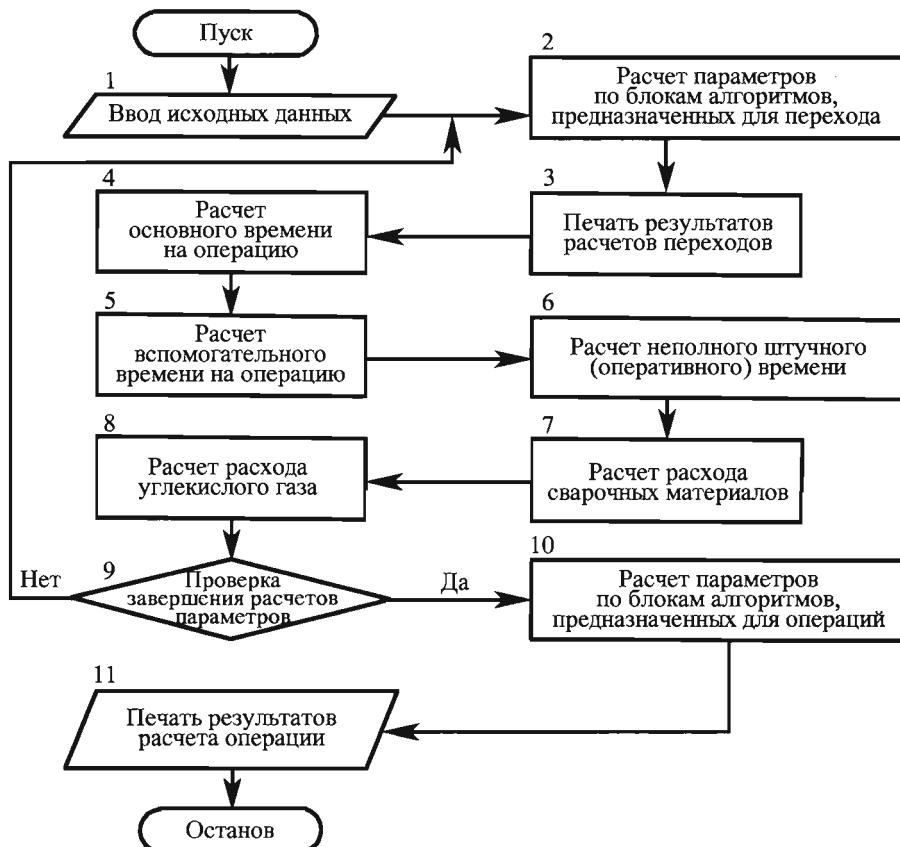


Рис. 17.2. Ориентировочная блок-схема управляющего алгоритма расчета режимов и технических норм времени сварочных операций

Алгоритмы и программы базируются на методе дифференцированного нормирования трудовых действий, приемов и т.д., что обеспечивает высокое качество расчетов и возможность анализа трудового процесса. Рабочими программами на ЭВМ предусматривается определение кроме режимов сварки и норм времени ряда величин, используемых при расчетах норм расхода сварочных материалов, сменной производительности, расценок на операцию и т.д.

Экономическая эффективность от применения программ для автоматизации технического нормирования сварочных операций (процессов и работ) должна определяться на стадии технологической подготовки производства и при осуществлении производственного процесса.

Экономия на стадии технологической подготовки  $\mathcal{E}_{т.п}$  достигается снижением затрат на расчеты в результате сокращения численности ИТР, обусловленного ростом производительности инженерного труда, а также повышением отдачи высвободившихся квалифицированных специалистов при использовании их на творческих работах по созданию прогрессивных, качественно новых ТП.

При выполнении производственного процесса экономию  $\mathcal{E}_{п.п}$  получают в результате оплаты труда рабочих по технически обоснованным нормам, установленным с помощью программ на ЭВМ.

Общая экономия  $\mathcal{E}_{об}$  представляет собой сумму указанных величин:

$$\mathcal{E}_{об} = \mathcal{E}_{т.п} + \mathcal{E}_{п.п}.$$

Затраты на технологическую подготовку  $C_{т.п}$  сварочного производства зависят от сложности сварных конструкций и объема их выпуска:

$$C_{т.п} = \sum_{i=1}^n C_{ij} N_{ij},$$

где  $C_{ij}$  – затраты на расчет вручную режимов и технических норм времени  $i$ -го ТП  $j$ -й сложности;  $N_{ij}$  – число  $i$ -х ТП  $j$ -й сложности;  $n$  – число проектируемых ТП.

Определение режимов сварки и технических норм времени на ЭВМ связано с выполнением следующих работ:

- занесением исходных данных в специальный бланк; подготовкой и вводом в ЭВМ исходных данных;
- перфорацией исходных данных с бланком на перфоленту (перфокарту);
- контролем перфорации и решением задач на ЭВМ.

Исходя из сказанного, затраты на техническое нормирование с помощью ЭВМ  $C_{м.э}$  могут быть определены по формуле

$$C_{м.э} = \sum_{i=1}^n (C_{з.б. j} + C_{пер. j} + C_{м. j}) N_i,$$

где  $C_{з.б. j}$  – затраты на заполнение бланка исходных данных ТП;  $C_{пер. j}$  – затраты на перфорацию исходных данных и контроль перфорации  $i$ -го ТП;  $C_{м. j}$  – затраты, связанные с использованием машинного времени ЭВМ при нормировании  $i$ -го ТП;  $N_i$  – число  $i$ -х ТП.

Применение ЭВМ для технического нормирования целесообразно при  $C_{т.п} > C_{м.э}$  и когда достигается наибольшая разность между указанными величинами, т.е.

$$C_{т.п} - C_{м.э} \rightarrow \max.$$

#### 17.10.3. НОРМИРОВАНИЕ РУЧНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ

Расчет норм при этом виде сварки, как и других рассматриваемых ниже, начинается с определения основного времени  $t_o$  (в ч или мин), в течение которого образуется сварной шов наплавлением электродного металла:

$$t_o = Fly / I\alpha_h$$

или

$$t_o = 60Fly / I\alpha_h,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения наплавленного металла;  $l$  – длина шва;  $\gamma$  – плотность наплавленного металла;  $I$  – сварочный ток;  $\alpha_h$  – коэффициент наплавки.

Массу наплавленного металла  $G$  определяют по формуле

$$G = \alpha_h It,$$

где  $t$  – время горения дуги.

Площадь поперечного сечения наплавленного металла  $F$  может быть определена разделением его на простые геометрические фигуры и подсчетом их площадей, а также по таблицам нормативов времени на сварку. Плотность наплавленного металла шва  $\gamma$  принимается равной плотности основного металла.

Силу тока  $I$  при ручной дуговой сварке устанавливают в соответствии с маркой и диаметром электрода, толщиной металла, видом шва и положением его при сварке. Коэффициент наплавки  $\alpha_h$  [ $g/(A \cdot \text{ч})$ ] – это масса металла в граммах, наплавленного за 1 ч горения дуги, отнесенная к силе тока на 1 А. На величину  $\alpha_h$  влияют: род сварочного тока, его полярность и плотность, свойства электродной проволоки и покрытий электрода и марки флюса

$$\alpha_h = G / It.$$

Влияние указанных выше факторов на  $\alpha_h$  характеризуют в общем виде данные табл. 17.6.

Основное время (в мин) на сварку шва длиной 1 м за один проход

$$t_o = 60\gamma F / I\alpha_h.$$

При многопроходной сварке основное время (в мин) на 1 м длины шва определяется соответственно по формуле

$$t_o = 60\gamma \frac{F_1}{I_1 \alpha_{h1}} + \frac{F_2}{I_2 \alpha_{h2}} + \dots + \frac{F_n}{I_n \alpha_{hn}},$$

где  $1, 2, \dots, n$  – число проходов (слоев).

### 17.6. Коэффициенты наплавки

Электрод	Положение шва при сварке	Вид тока	$\alpha_n$ , г/(A · ч)
Без покрытия	Вертикальное кольцевое и нижнее	Постоянный	10
		Переменный	8,2
С меловым покрытием	Горизонтальное и потолочное	Постоянный	5,6
		Переменный	6,2

Правильный и рациональный режим сварки предопределяется прежде всего типом и диаметром электрода, величиной сварочного тока. Диаметр электрода подбирают по толщине металла свариваемых элементов и форме сечения сварного шва, а тип электродов по данным их паспорта и изготовителя.

#### Ориентировочные соотношения между толщиной и диаметром электрода

Толщина, мм	1...2	3...5	4...10	12...24	30...60
Диаметр, мм	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7

При толщине свариваемых элементов  $>6$  мм швы выполняют многопроходной сваркой.

Вспомогательное время при сварке конструкций тратится на:

- смену электродов  $t_3$ ;
- зачистку швов и кромок  $t_3$  (определяют по приведенным ниже формулам);
- очистку швов от шлака и брызг расплавленного металла;
- измерение и клеймение швов;
- установку, повороты, закрепление и снятие сварных конструкций;

– перемещение сварщика с инструментами и т.д.

$$t_3 = t_{31} F / V_{\text{эф}},$$

где  $t_3$  – время на смену одного электрода;  $V_{\text{эф}}$  – эффективный объем одного электрода.

$$t_3 = l [0,6 + 1,2 (n_c - 1)],$$

где  $l$  – длина шва;  $n_c$  – число слоев при многопроходной сварке.

Время на очистку промежуточного слоя 1...2 мин на 1 м длины шва, время на очистку 1 м длины шва последнего слоя 0,6 мин. Время на установку клейма принимается равным 0,03 мин на один знак. Время на измерение и осмотр шва определяется умножением длины его на 0,35 для нижнего, вертикального и горизонтального швов и на 0,5 для потолочного шва. Время на обслуживание рабочего места  $\sim 2...5\%$  оперативного времени  $t_{\text{опер}}$ . Время на отдых и личные надобности может быть принято в размере 5...15 %  $t_{\text{опер}}$ . Подготовительно-заключительное время в серийном производстве  $\sim 2...4\%$   $t_{\text{опер}}$ . В единичном производстве для определения этого времени можно воспользоваться данными табл. 17.7.

### 17.7. Нормативы подготовительно-заключительного времени при сварке на сборочной площадке, мин

Элемент работы	Подготовка к сварке		
	простая	средняя	сложная
Получение производственного задания и инструктажа	5	7	12
Ознакомление с работой	3	5	8
Подготовка приспособлений	–	3	5
Сдача работы	2	2	2
Всего	10	17	27

Нормы штучного времени на ручную электросварку 1 м длины шва рассчитывают по формуле

$$t_{шт} = [(t_0 + t_{вш})l + t_{вк}]k,$$

где  $t_{вш}$  – вспомогательное время, связанное со сварным швом;  $t_{вк}$  – вспомогательное время, связанное со сваркой конструкций и зависящее от типа оборудования;  $k$  – коэффициент, учитывающий время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности.

#### 17.10.4. НОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Основное время при данном виде сварки определяется по формулам, приведенным в разд. 17.10.3.

Основное время при сварке однопроходных швов с заданной скоростью находят по формулам

$$t_0 = 60l / v_{cb};$$

для 1 м длины шва:

$$t_0 = 60 / v_{cb},$$

где  $l$  – длина шва данного размера;  $v_{cb}$  – скорость сварки этого шва.

При выполнении швов многопроходной сваркой

$$t_0 = 60 \left( \frac{1}{v_{cb_1}} + \frac{1}{v_{cb_2}} + \dots + \frac{1}{v_{cb_n}} \right),$$

где  $v_{cb_1}$ ,  $v_{cb_2}$ , ...,  $v_{cb_n}$  – скорость сварки соответственно при 1, 2, ...,  $n$  проходах.

В табл. 17.8 и 17.9 приведено основное время, затрачиваемое на механизированную сварку таврового соединения и на автоматическую сварку V-образных швов стыкового соединения.

#### 17.8. Основное время на механизированную сварку под флюсом швов таврового соединения без скоса кромок (одно- и двусторонних)

Катет шва, мм	Число проходов	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Время на 1 м длины шва, мин
3	1	1,6	220...230	24...26	40	1,5
4			280...290	26...28	30	2
3...4		2	280...320	28...30	50...60	1
5...6			300...340	30...32	25...30	2
7			340...380		20...25	2,4
8...10		3	380...420		18...20	3
12	2			32...34	20...25	4,8

**Примечание.** Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности.

#### 17.9. Основное время на автоматическую сварку стыковых соединений V-образных со скосом двух двусторонних кромок

Толщина металла, мм	Число проходов	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Время на 1 м длины шва, мин
5	1	3	440...450	32...34	50...60	1
6...8		4...5	550...600		35...40	1,5
10...14		4	700...990	36...38		

Вспомогательное время при автоматической сварке нормируется, как и при ручной дуговой, с использованием нормативов или данных хронометражных наблюдений. Однако структура  $t_{\text{в}}$  имеет определенные отличия. Они обусловлены зависимостью  $t_{\text{в}}$  от сварного шва  $t_{\text{в.ш}}$ , сложности сварных конструкций и типа оборудования  $t_{\text{в.к}}$ :

$$t_{\text{в}} = t_{\text{в.ш}} + t_{\text{в.к}}.$$

Время  $t_{\text{в.ш}}$  расходуется на осмотр и зачистку свариваемых кромок (табл. 17.10), насыпку флюса в бункер полуавтомата, сбор флюса, зачистку швов от шлака, их осмотр, измерение и т.д.

В зависимости от толщины свариваемого металла, вида соединений и сварных швов  $t_{\text{в.ш}}$  может колебаться в широком диапазоне (1,5...25 мин на 1 м длины шва при изменении толщины металла от 3 до 50 мм).

Вспомогательное время  $t_{\text{в.к}}$  предназначается для:

- установки головки полуавтомата в начале шва;

- перемещения сварщика с полуавтоматом и инструментом (от шва к шву);
- установки, закрепления, поворота и снятия конструкций;
- клеймения шва, заправки кассет ( $t_{\text{з.к}}$ ) и т.д. (табл. 17.11 – 17.13).

Время на заправку кассет  $t_{\text{з.к}}$  определяют по формуле

$$t_{\text{з.к}} = t_{\text{о.з}} G_{\text{н}} / G_{\text{пр}},$$

где  $t_{\text{о.з}}$  – время на одну заправку кассеты;  $G_{\text{н}}$  – масса 1 м длины шва;  $G_{\text{пр}}$  – масса электродной проволоки, заправляемой в одну кассету.

Время обслуживания рабочего места  $t_{\text{обс}}$  складывается из времени на:

- регулирование заданного режима;
- включение и выключение оборудования и механизмов;
- раскладку и уборку инструмента;
- установку и смену кассеты с электродной проволокой;
- засыпку флюса в начале смены и удаление его после окончания работы;
- промывку и продувку рукава при механизированной сварке;
- уборку рабочего места и т.д.

#### 17.10. Время на зачистку 1 м длины свариваемых кромок перед сваркой, мин

Толщина металла, мм	Стыковой, угловой, тавровый швы	
	без скоса кромок	со скосом кромок
До 20	0,3	0,4
До 30	0,4	0,5
>30	0,5	0,6

#### 17.11. Вспомогательное время $t_{\text{в.к}}$ на установку в приспособление или на рабочее место конструкций, поворот и снятие их краном

Масса конструкции, кг, до	Установка или поворот				Снятие и транспортировка			
	Длина конструкции, м, до							
	4	6	8	10	4	6	8	10
100	1,7	1,9	2,0	2,1...2,2	1,2	1,3	1,5	1,6...1,7
200	1,9	2,0	2,2	2,3...2,4	1,4	1,6	1,8	2,2...2,0
300	2,0	2,1	2,3	2,4...2,5	1,6	1,8	2,0	1,1...2,2
500	2,3	2,5	2,6	2,8...2,9	1,9	2,1	2,3	2,4...2,5

**17.12. Время  $t_{в.ш}$  на механизированную электросварку под флюсом 1 м длины шва, мин**

Вид работы	Шов многопроходной сварки	Шов однопроходной и завершающий проход многопроходной сварки		
		стыковой	угловой	
			сплошной	точечный
Сбор флюса со шва, засыпка его во флюсосборник	0,3	0,3	0,3	0,2
Очистка шва от шлака	1	0,2	0,35	0,3
Осмотр и измерение шва			0,2	
Удаление остатка проволоки полуавтомата и ее подача в головку, смена кассеты	0,1	0,1	0,1	0,1

**17.13. Время на одно перемещение сварщика с инструментом**

Расстояние перемещения, м, не более	Время на одно перемещение, мин	Расстояние перемещения, м, не более	Время на одно перемещение, мин
2	0,3	8	0,75
4	0,4	10	0,9
6	0,6	12	1,1

Это время и время на отдых и личные надобности рассчитывают с использованием нормативов, приведенных в табл. 17.14 и 17.15.

Нормативы для определения подготовительно-заключительного времени даны в табл. 17.16.

Подготовительно-заключительное время для простых и сложных работ может быть определено соответственно в размере 2...6 % от оперативного времени.

Норма штучного времени на сварку 1 м длины шва определяется для рассмотренных видов сварки по формуле

$$t_{шт} = [(t_0 + t_{в.ш})l + t_{в.к}]k,$$

где  $t_{в.ш}$  – вспомогательное время, связанное со сварным швом;  $t_{в.к}$  – вспомогательное время, связанное со сваркой конструкций и зависящее от типа оборудования;  $k$  – коэффициент, учитывающий время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности.

**17.14. Время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности при автоматической сварке в удобном положении**

Оборудование	Время		Коэффициент к оперативному времени
	на обслуживание рабочего места	на отдых и личные надобности	
	% от оперативного времени		
Стационарные установки	5	4	1,09
Переносные автоматы	6	5	1,11
Разного назначения	8; 9	10; 12	1,18; 1,21

### 17.15. Время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности при механизированной сварке

Условия выполнения	Время		Коэффициент к оперативному времени
	на обслуживание рабочего места	на отдых и личные надобности	
	% от оперативного времени		
В удобном положении	7	6	1,13
В неудобном положении	9	11	1,2
В закрытых свободных или полуоткрытых тесных емкостях	12	18	1,3
Сварка конструкций с использованием переносных лестниц высотой >3 м	15	20	1,35
Сварка крупногабаритных, объемных и полуобъемных конструкций с помощью кондукторов и кантователей	18	27	1,25

### 17.16. Укрупненные нормативы подготовительно-заключительного времени, мин

Вид работы	Работа		
	простая <sup>1</sup>	средней сложности <sup>2</sup>	сложная <sup>3</sup>
Получение производственного задания	3		
Получение инструктажа и указаний	3	4	6
Ознакомление с работой, технологией, чертежами	3	4	6
Подготовка приспособлений	–	3	5
Установка кассет с проволокой, засыпка флюса в бункер	6		
Выбор режима сварки:			
– силы тока	2,8		
– скорости сварки и подачи проволоки:			
перестановкой сменных шестерней	9		
изменением положения рукоятки	0,2		
заменой подающего ролика	1,3		
заменой ходовых бегунов	5,5		
Сдача и оформление работ	3	4	5

<sup>1</sup> Сварка и наплавка малоответственных конструкций в нижнем положении и в лодочку, прямолинейных швов при толщине свариваемого металла до 16 мм.

<sup>2</sup> Сварка ответственных конструкций в нижнем положении и в лодочку, прямо- и криволинейных швов длиной до 4 м при толщине свариваемого металла до 40 мм, когда сварщику приходится знакомиться с чертежами и технологией, подготавливать приспособление.

<sup>3</sup> Сварка ответственных конструкций в различном положении при толщине свариваемого металла >40 мм и длине шва >4 м.

### 17.10.5. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Основное время при электрошлаковой сварке затрачивается на расплавление кромок свариваемой конструкции и присадочного материала, а также на формирование шва свариваемого соединения. Это время, в мин на 1 м длины шва, определяется по формуле:

$$t_o = 60 / v_{cb},$$

где  $v_{cb}$  – скорость сварки, рассчитываемая с учетом конструктивной характеристики шва и вида электрода.

Некоторые нормативы вспомогательного времени, времени на обслуживание рабочего места, отдых, личные надобности и подготовительно-заключительного времени при этом виде сварки приведены ниже.

#### Вспомогательное время на 1 м длины шва, мин

Зачистка свариваемых кромок от окалины, шлака, ржавчины вручную, зубилом и щеткой .....	1,0
Покрытие медных подкладок огнеупорной глиной, асбестом в удобном положении .....	2,0
То же, в неудобном положении .....	3,5
Зачистка шва от шлака, глины, асбеста после сварки (с одной стороны) вручную зубилом и щеткой; осмотр швов .....	0,4
Передвижение аппарата в исходное положение для сварки прямолинейных швов сверху вниз, корректировка положения мундштука в зазоре по длине шва .....	1,0

#### Вспомогательное время, связанное с изделием и работой оборудования, мин

##### Установка:

направляющей рейки с аппаратом на изделие и снятие их после сварки .....	12,0
аппарата типа А-340 на изделие, крепление и снятие его после сварки .....	5,0...9,0
кассеты массой до 250 кг на стойки стендса и снятие их:	
на полу .....	2,0
на балконе краном .....	4,5
Установка токоподвода к изделию .....	2,0...3,5
Установка, крепление и снятие стойки, штанги и внутреннего ползуна при сварке кольцевых швов .....	50,0

Установка и крепление пластинчатого электрода .....	8,0
---	-----

То же, плавящегося мундштука в зазор с постановкой изолятора по длине шва и гибкого шланга с проволокой, снятие шланга после сварки при длине мундштука:

до 1 м .....	12,0
до 2 м .....	15,0
>2 м .....	20,0

Зарядка аппарата (мундштука) электродной проволокой, поперечная корректировка мундштука по зазору .....	2,5
---	-----

Установка концевика возвратно-поступательного движения по зазору .....	2,2
--	-----

Установка и крепление медных подкладок для сварки прямолинейных швов, подключение к ним шлангов с охлаждающей водой, снятие их после сварки при длине подкладки:	
до 1 м .....	5,0
до 3 м (из двух частей) .....	8,0

Установка кармана и двух выходных планок, прихватка их, покрытие глиной и засыпка флюсом с металлической стружкой перед сваркой .....	7,5
---	-----

Установка ползуна на подвеску, поджатие его к изделию, покрытие глиной, снятие ползуна после сварки .....	2,5
---	-----

Определение схемы работы установки в соответствии с инструкцией .....	7,0
---	-----

Скорость сварки плавящимся мундштуком (пластинчато-проводочными электродами):

$$v_{\text{п.эл}} = \frac{7,06 n_{\text{эл}} V_{\text{эл}}}{F_{\text{э.п}}},$$

где  $F_{\text{э.п}} = F_{\text{об}} - F_{\text{п.т}}$  – площадь поперечного сечения шва, наплавляемая электродной проволокой,  $\text{мм}^2$  ( $F_{\text{об}}$  – общая площадь поперечного сечения наплавленного металла шва,  $\text{мм}^2$ ;  $F_{\text{п.т}}$  – площадь поперечного шва, наплавленная пластинчатыми и трубчатыми электродами,  $\text{мм}^2$ ).

### 17.10.6. НОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ СВАРКИ

Нормирование этого вида сварки начинается также с определения основного времени, затрачиваемого на разогрев металла и наплавление шва. В связи с этим  $t_o$  включает в себя время непосредственно на сварку и время на разогрев свариваемых кромок в начале сварки (табл. 17.17 и 17.18).

Основное время сварки на 1 м длины шва  $t_{o.w}$  рассчитывают по формуле

$$t_{o.w} = t_h F,$$

где  $t_h$  – время наплавки 1 см<sup>3</sup> металла (см. табл. 17.17);  $F$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>.

Следовательно, основное время сварки шва определенной длины может быть рассчитано по формуле

$$t_o = t_{o.w}l + t_{o.p}(n - 1),$$

где  $l$  – длина свариваемого шва, м;  $t_{o.p}$  – время на один разогрев свариваемых кромок, мин;  $n$  – число свариваемых швов на конструкции.

Вспомогательное время при сварке швов затрачивается: на смену присадочной проволоки; приварку прутка к огарку в процессе сварки; осмотр и очистку кромок шва, на его измерение.

Вспомогательное время при сварке конструкций идет: на установку, закрепление, снятие ее; перемещение сварщика, клеймение шва. Устанавливают вспомогательное время по таб-

лицам нормативов в зависимости от вида стыковых соединений и массы конструкции.

Время на обслуживание рабочего места предназначается: для раскладки инструмента в начале работы и уборки его после работы, зажигания, прочистки, тушения горелки, установки и смены баллонов, подключения и отключения рукавов, поддержания режима сварки и т.д. При укрупненных расчетах время на обслуживание рабочего места принимается в размере 10 %, а время на отдых и личные надобности – в размере 7 % оперативного времени. Подготовительно-заключительное время составляет ~2...4 % оперативного времени. Норма штучного времени определяется суммированием перечисленных выше затрат времени

$$t_{шт} = [(t_o + t_{в.ш})l_w + t_{o.p}n + t_{в.к}] k,$$

где  $t_{в.ш}$  – вспомогательное время на сварку шва;  $l_w$  – длина шва;  $t_{в.к}$  – вспомогательное время на сварку конструкции;  $k$  – коэффициент, учитывающий затраты времени на обслуживание рабочего места, перерывы на отдых и личные надобности ( $k = 1,11 \dots 1,24$ ).

#### 17.17. Время наплавки 1 см<sup>3</sup> металла ацетиленокислородным пламенем

Толщина свариваемой детали, мм	Номер наконечника	Время наплавки 1 см <sup>3</sup> , мин	Толщина свариваемой детали, мм	Номер наконечника	Время наплавки 1 см <sup>3</sup> , мин
1...1,5	1	1,3	10...12	5	0,52
2...4	2	1,1	13...18	6	0,42
5...7	3	0,73	19...30	7	0,38
7...8	4	0,62			

#### 17.18. Основное время на разогрев свариваемых кромок в начале сварки

Толщина металла, мм, не более	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Время, мин, не более	0,1	0,14	0,18	0,25	0,33	0,4	0,47	0,55	0,6

#### 17.10.7. НОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Норма штучного времени на контактную сварку (точечную, шовную, стыковую) включает в себя основное и вспомогательное время, время на обслуживание рабочего места, на отдых и личные надобности. Основное время  $t_o$  зависит от продолжительности прямого и обратного хода электрода. Оно состоит из времени на опускание и сближение электродов, их сжатие, протекание тока, выдержку электрода при повышенном давлении и возвращение электрода в исходное положение. Основное время определяется по формулам, приведен-

ным ниже или по таблицам нормативов, разработанным для отдельных видов контактной сварки (табл. 17.19, 17.20).

Основное время шовной сварки, мин,

$$t_{o.w} = l_w / v_{cb},$$

где  $l_w$  – длина шва;  $v_{cb}$  – скорость сварки.

Основное время стыковой сварки, мин,

$$t_{o.c} = (1 / n) + t_{v.k},$$

где  $n$  – число рабочих ходов электрода в минуту;  $t_{v.k}$  – время включения рабочего хода.

#### 17.19. Основное время точечной сварки на машинах автоматического и неавтоматического управления

Число ходов в минуту	Время на одну точку или ход, мин	Число ходов в минуту	Время на одну точку или ход, мин
10	0,1	50	0,02
12	0,084	60	0,017
14	0,072	72	0,014
17	0,059	86	0,011
20	0,05	100	0,01
24	0,042	120	0,0082
29	0,035	140	0,0071
35	0,029	170	0,0059
42	0,024	200	0,005

#### 17.20. Основное время, мин, стыковой сварки (на один стык) оплавлением низкоуглеродистой стали

Площадь сечения стыка, $\text{мм}^2$	Номинальная мощность машины, $\text{kV} \cdot \text{A}$	Сварка деталей			
		с подогревом		без подогрева	
		сплошного сечения	с развитым периметром	сплошного сечения	с развитым периметром
30	10	0,05	Не применяется	–	Не применяется
50		0,06		0,16	
80		0,08		0,18	
120		0,1		0,2	
150		0,12		0,23	
200		0,15		0,25	
250	30	0,17		0,28	
300		0,19		0,31	
400		0,21		0,34	

Окончание табл. 17.20

Площадь сечения стыка, $\text{мм}^2$	Номинальная мощность машины, $\text{kV} \cdot \text{A}$	Сварка деталей			
		с подогревом		без подогрева	
		сплошного сечения	с развитым периметром	сплошного сечения	с развитым периметром
500	100	0,25	0,17	0,4	0,29
600		0,28	0,2	0,46	0,34
700		0,31	0,22	0,52	0,38
800		0,34	0,24	0,58	0,46
1000	250	0,39	0,28	0,72	0,53
1200		—	0,34	—	0,6
2000		—	—	—	0,68

Основное время точечной сварки, мин:

$$t_{\text{o.t}} = (1/n) + (t_{\text{в.к}}/m),$$

где  $m$  – число свариваемых точек за одно включение машины.

Вспомогательное время при контактной сварке рассчитано: на установку и снятие элементов конструкции, закрепление, открепление, повороты и перемещение их на шаг, на

зачистку электрода при сварке алюминиевых сплавов и коррозионно-стойких сталей.

В массовом производстве вспомогательное время может быть определено по нормативам, приведенным в табл. 17.21 – 17.23.

Время обслуживания рабочего места определяется по данным фотографии рабочего дня, установленным нормативам и в виде укрупненных коэффициентов к оперативному времени (табл. 17.24).

### 17.21. Вспомогательное время, мин, на установку детали на стол, в приспособление или кондуктор при точечной и шовной сварке

Масса детали, кг, не более	Способ установки				
	свободно, без фиксации	с выверкой по одной плоскости	с выверкой по двум плоскостям	по контуру, риске	по штырю
2	0,043	0,073	0,12	0,047	0,063
3	0,048	0,08	0,13	0,052	0,069
5	0,053	0,088	0,14	0,057	0,076
7	0,058	0,097	0,16	0,063	0,084
10	0,064	0,11	0,17	0,069	0,092
15	0,07	0,12	0,18	0,076	0,1

### 17.22. Время, мин, на закрепление и открепление детали при точечной, шовной и стыковой сварке

Тип зажимного приспособления	Время на один зажим, мин
Пневматический или пневмогидравлический	0,016
Эксцентриковый	0,02
Рычажный или откидная планка	0,053

**17.23. Вспомогательное время, мин, при стыковой сварке сплошного сечения**

Площадь свариваемого сечения, $\text{мм}^2$	Гидравлические, пневматические, механические зажимы	Ручные рычажные винтовые зажимы
100...200	0,6	0,7...0,8
200...600	0,7	0,8...1,0
600...1000	0,75	1,0...1,2
1000...1500	0,8	1,2...1,4
1500...2500	1,0	1,4...1,7

**17.24. Время, % от  $t_{\text{опер}}$ , на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности**

Сварка	Оборудование	Рабочая поза	Обслуживание рабочего места	Отдых и личные надобности	Коэффициент $t_{\text{опер}}$
Точечная	Стационарная машина	Сидя	4	6	1,1
					1,11
			5		1,12
Шовная	Стационарная машина	Стоя	4	7	1,11
Стыковая	Машина с пневматическим управлением		6		1,13
	Машина с автоматическим управлением		7	17	1,14

На подготовительно-заключительное время  $t_{\text{п.з.}}$ , затрачиваемое на получение задания, ознакомление с работой, установку клещей, пистолета и их снятие, настройку машины и сдачу готовой продукции, отводится 6...10 мин на партию при выполнении работы на стационарной машине (клещах); при применении пистолета – 5 мин.

Нормы штучного времени рассчитывают для рассмотренных видов сварки по следующим формулам:

$$t_{\text{шт.т}} = (t_0 i + t_b)k;$$

$$t_{\text{шт.щ}} = (t_0 l + t_b)k;$$

$$t_{\text{шт.с}} = (t_0 + t_b)k,$$

где  $i$  – число точек, свариваемых за данную операцию;  $l$  – длина свариваемого шва, м;  $t_b$  – вспомогательное время, связанное со свариваемым швом и свариваемыми изделиями;  $k$  – коэффициент, учитывающий время для обслуживания рабочего места, отдыха и личных надобностей.

**17.10.8. НОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА**

Основное время газовой резки  $t_{\text{o.газ}}$  – это время, в течение которого под действием струи кислорода и подогревательного пламени осуществляется резка металла,

$$t_{\text{o.газ}} = t_{01} l + t_{02} n_n,$$

где  $t_{01}$  – основное время резки 1 м;  $l$  – расчетная длина реза на одну деталь;  $t_{02}$  – основное время на один подогрев в начале реза;  $n_p$  – число подогревов в начале резки на одну деталь.

При этом на 1 м длины реза

$$t_{01} = 1 / v_p,$$

где  $v_p$  – скорость резки, устанавливаемая по паспортным данным оборудования и аппаратурой.

Основное время непосредственно резки  $t_{01}$  и на один подогрев металла  $t_{02}$  может быть определено по нормативам (табл. 17.25).

Основное время, рассчитанное по таблицам нормативов, корректируется с помощью коэффициентов, учитывающих: чистоту кислорода, род горючего, вид стали, класс качества поверхности реза и положение линии реза в пространстве (табл. 17.26).

Вспомогательное время, как и при сварке, подразделяется на время, зависящее от длины реза (время на корректировку движения резака, очистку загрязнений на металле, осмотр и проверку качества отрезаемых кромок деталей, зачистку их от шлака), и время, зависящее от изделия и типа оборудования (время на подвод суппорта с резаком к листу, установку его в исходное положение и отвод, установку и выверку копира, передвижение резчика и т.д.).

### 17.25. Основное время механизированной фигурной резки малоуглеродистой стали

Толщина металла, мм, не более	Скорость резки, мм/мин	Время на 1 м длины реза, мин	Время на один подогрев в начале резки, мин			
			Используемый газ			
			от кромки листа	в замкнутом контуре листа		
			Ацетилен	Городской газ	Ацетилен	Городской газ
5	645	1,55	0,095	0,15	0,23	0,37
10	585	1,71	0,12	0,19	0,28	0,45
15	515	1,94	0,135	0,22	0,34	0,54
20	490	2,04	0,145	0,23	0,39	0,62
25	455	2,2	0,155	0,25	0,44	0,7
30	435	2,3	0,17	0,27	0,48	0,77
35	410	2,44	0,18	0,29	0,52	0,83
40	390	2,56	0,30	0,3	0,58	0,93

### 17.26. Поправочные коэффициенты к основному времени газовой резки

Чистота кислорода, %	$k$
99,9	0,92
99,0	1,11
99,5	1,0...1,19
99,2	1,06
98,0	1,25

<b>Поправочные коэффициенты к основному времени при резке стали</b>		<b>Подготовительно-заключительное время, мин, по элементам работ при газовой резке металла</b>	
Углеродистые и малолегированные, содержащие до 0,4 % С .....	1,1	Получение задания и инструктажа .....	3,0
Марганцовистые среднелегированные, содержащие ванадий и молибден (до 0,7 % С) .....	1,2	Ознакомление с работой .....	2,0
Хромоникелевые и высоколегированные ....	1,3	Получение и сдача инструмента .....	2,0
<b>Поправочные коэффициенты к основному времени при положении линии реза в пространстве</b>			
Нижнее наклонное .....	1,0	Установка и снятие копира, шаблона при машинной резке .....	5,2
Вертикальное (сверху вниз) .....	1,05	Установка и снятие циркуля .....	1,0
Горизонтальное .....	1,1	Подключение рукавов к резаку, магистрали, баллонам и отключение их .....	3...5
<b>Нормативы вспомогательного времени, мин, зависящие от изделия и оборудования</b>			
Установка резака под углом .....	0,3	Установка:	
Подвод суппорта с резаком к месту, отвод, установка в исходное положение, выверка листа .....	3,5	– давления газов .....	0,8
Клеймение .....	0,1	– скорости резки .....	0,2
Перевод машины от одной детали к другой .....	0,5	Подготовка к работе:	
Передвижение резчика и перестановка направляющего пути переносной машины при перемене направления реза .....	4,0	– резака .....	0,8
Установка и выверка копира .....	0,5	– керосинореза .....	1,5
Установка резака и циркуляция на заданный размер при резке по окружности .....	0,6	Установка и снятие катков к резаку .....	0,4

Время обслуживания рабочего места зависит от типа оборудования, условий выполнения работы и толщины разрезаемого металла; составляет при машинной резке 4...6 % и при ручной 3...12 %  $t_{\text{опер}}$ . Время перерывов на отдых и личные надобности при машинной резке занимает 5...6 % и при ручной 7...10 %  $t_{\text{опер}}$ .

При укрупненных расчетах подготовительно-заключительное время принимают в размере 2...6 % от  $t_{\text{опер}}$ .

Норма штучного времени  $t_{\text{шт.газ}}$  определяется по формулам

$$t_{\text{шт.газ}} = [(t_{01} + t_{\text{в.р}}) l + t_{02}n + t_{\text{в.и.о}}]k;$$

$$t_{\text{шт.газ}} = [(t_{01}k_n + t_{\text{в.р}}l + t_{02} + t_{\text{в.н}}]k,$$

где  $t_{\text{в.р}}$  – вспомогательное время на 1 м реза, зависящее от длины реза;  $t_{\text{в.и.о}}$  – вспомогательное время, связанное с конфигурацией изделия и работой оборудования;  $k$  – коэффициент, учитывающий время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий чистоту кислорода, род горючего и вид стали;  $t_{02}$  – основное время на подогрев металла в начале реза на одну деталь;  $t_{\text{в.н}}$  – вспомогательное время, зависящее от конфигурации изделия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белянин П.Н. Промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1975. 398 с.

2. Виноградов В.С. Технологическая подготовка производства сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 223 с.
3. Грачева К.А. Экономика, организация и планирование сварочного производства. М.: Машиностроение, 1984. 368 с.
4. Козырев Ю.Г. Наладка и эксплуатация станков с числовым программным управлением и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1980. 52 с.
5. Маниловский Р.Г. Производственные мощности машиностроительного завода. М.: Машиностроение, 1973. 161 с.
6. Нормирование труда / Под ред. Б.Н. Генкина. М.: Экономика, 1985. 270 с.
7. Сварка в машиностроении: Справочник. В 3-х т. Т. 3 / Под ред. В.А. Винокурова. М.: Машиностроение, 1979. 531 с.
8. Справочник сварщика / Под ред. В.В. Степанова. М.: Машиностроение, 1982. 560 с.
9. Чвертко А.И., Патон В.Е., Тимченко В.А. Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки. М.: Машиностроение, 1981. 264 с.
10. Черпаков Б.И. Эксплуатация автоматических линий. М.: Машиностроение, 1978. 243 с.
11. Юренич Е.И., Аветиков Б.Г., Корытко О.Б. Устройство промышленных роботов. Л.: Машиностроение, 1980. 333 с.

# Г л а в а 18

## БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### 18.1. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

#### 18.1.1. ОПАСНЫЕ И ВРЕДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ

Перечень этих факторов приведен в табл. 18.1 в соответствии с ГОСТ 12.3.003–86\*. Они подразделяются на химические, физические и психофизиологические. Воздействие вредных производственных факторов на работающих может привести к заболеванию и снижению производительности труда. Это прежде всего:

- поступление в зону дыхания сварочных аэрозолей<sup>1</sup>, содержащих в составе твердой фазы оксиды различных металлов (марганца, хрома, никеля, железа и др.) и токсичные газы (CO, O<sub>3</sub>, HF, NO<sub>2</sub> и др.);
- чрезмерная запыленность и загазованность воздуха вследствие попадания пыли флюсов, подгорания масла и т.п.;
- повышенная температура поверхностей оборудования, материалов и воздуха в рабочей зоне (РЗ)<sup>2</sup>, особенно при сварке с подогревом изделий;
- излишняя яркость сварочной дуги, УФ- и ИК-радиация;
- воздействие переменных магнитных полей при КС и высокочастотных ЭМП – при сварке ТВЧ;
- действие ионизирующих излучений – при ЭЛС, проведении γ- и рентгеноскопии сварных швов, использовании торированных вольфрамовых электродов;
- влияние шума и вибраций имеет место при плазменной и газовой резке, работе пневмопривода (КС), различного оборудования (вакуум-насосов, вентиляторов, сварочных

трансформаторов и др.), а также ультразвука и высокочастотного шума – при УЗС.

При ручной и механизированной сварке и резке характерна статическая нагрузка на руки, а при автоматических способах – нервно-психические перегрузки из-за напряженности труда. Воздействие опасных производственных факторов может привести к травме или внезапному резкому ухудшению здоровья. Это действие электрического тока, искры и брызги расплавленного металла, движущиеся машины, механизмы и т.д. Использование открытого газового пламени, наличие расплавленного металла и шлака и т.п. увеличивают опасность возникновения пожара, а неправильное транспортирование, хранение и использование баллонов со сжатыми газами, нарушение правил эксплуатации газосварочного оборудования и т.п. – взрывов. Работа в монтажных и полевых условиях, особенно на высоте, без соответствующих предохранительных средств, ограждений может обернуться падением работающих, их травмированием.

#### 18.1.2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

Работы по сварке и резке должны выполняться в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.003–86\*, 12.1.004–91\*, 12.3.036–84\*, 12.3.039–85\*, 12.3.002–75\*, 12.1.010–76\* и Межотраслевыми правилами по охране труда при электро- и газосварочных работах ПОТР М-020–2001.

Уровни опасных и вредных производственных факторов в РЗ не должны превышать установленных значений: содержание вредных веществ (ВВ) – предельно допустимых концентраций (ПДК) по ГОСТ 12.1.005–88 (ПДК ряда веществ для воздуха РЗ и населенных мест приведены в табл. 18.2); уровни шума – по ГОСТ 12.1.003–83\* и санитарным нормам (СН 2.2.4/2.1.8.562–96) (табл. 18.3); уровни ультразвука – по ГОСТ 12.1.001–89; уровни локальной и общей вибрации – по ГОСТ 12.1.012–90; температура поверхности оборудования и

<sup>1</sup> Сварочный аэрозоль относится к аэрозолям конденсации и представляет собой дисперсную систему, состоящую из твердой фазы и газа или смеси газов.

<sup>2</sup> Рабочая зона – пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадки, где находятся рабочие места.

## 18.1. Характеристика сварочных и газоплазменных работ по опасным и вредным производственным факторам

Виды работы	Опасные и вредные производственные факторы														психофизиологические		
	химические	физические															
		сварочные и другие газородни газы		двигущиеся машины, механизмы, заготовки		повышенная температура, загазованность воздуха Р3		повышенная температура		повышенный уровень							
Ручная дуговая сварка:																	
- без подогрева изделия	+	-	+	+	+	-	-	-	-	ЭМП	магнитных полей	УФ	ИК	воздействие электрического тока	+		
- с подогревом или многопропходная	+	-	+	+	+	-	-	-	-	ионизирующих излучений	видимого света	ИК	искры, брызги расплавленного металла	физические перегрузки	+		
ДСФ:															нервно-психические перегрузки		
- механизированная	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	
- автоматическая	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	
- автоматическая с подогревом или многопропходная	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	

ДСЗГ:																					
- без подогрева	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
- с подогревом	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
- механизиро-ванная	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
- механизиро-ванная с по-догревом	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
- автоматическая	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	
ЭШС	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	
КС:																					
- точечная	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
- шовная	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
- рельефная	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
- оплавлением	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	
ЭЛС	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	
СТ	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
ДФС	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
УЗС	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
Сварка ТВЧ	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
Газовая сварка	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
Газовая резка	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
Плазменная сварка	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
Лазерная сварка и резка	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	
Пайка	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	

Примечания. 1. «+» – наличие фактора; «-» – отсутствие фактора.

2. Здесь и далее принятые следующие сокращения: РЗ – рабочая зона; ДСФ – дуговая сварка под флюсом; ДСЗГ – дуговая сварка в защитных глазах; УЗС – ультразвуковая сварка; ЭШС – электрошлаковая сварка; ЭЛС – электронно-лучевая сварка; КС – контактная сварка; СТ – сварка трением; ДФС – диффузионная сварка; ТВЧ – токи высокой частоты; ЭМП – электромагнитные поля; УФ, ИК – ультрафиолетовое, инфракрасное излучение.

**18.2. ПДК наиболее часто встречающихся ВВ в воздухе РЗ сварочных цехов и атмосферном воздухе населенных пунктов**

ВВ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>		Класс опасности	Агрегатное состояние
	в воздухе РЗ	в атмосферном воздухе		
Азота оксиды (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	5	0,4/0,06	2	П
Алюминий и его сплавы, оксид алюминия (в том числе, с примесью диоксида кремния) в виде аэрозоля конденсации	2	—	4	
Бериллий и его соединения	0,001	—	1	
Ванадий и его соединения:				
– дым пятиоксида ванадия	0,1	—	2	
– пыли трехоксида и пятиоксида ванадия	0,5	—	3	
Вольфрам	6	—	4	A
Железа оксид с примесью оксидов марганца (до 3 %), легированные стали и их смеси с алмазом до 5 %	4	—	1	
Железа оксид с примесью оксидов фтористых или 3...6 % марганцевых соединений	0,1/0,03*	0,001	2	
Кобальт металлический, оксид кобальта	0,5	0,01	3	
Марганец (до 20 % в сварочном аэрозоле)	0,2	—	1	
Медь металлическая	1/0,5*	—	П	
Молибден (растворимые соединения в виде аэрозоля конденсации)	2	—	A	
Молибден, нерастворимые соединения	6	—		
Никель, оксид никеля	0,05	—		
Озон	0,1	—		
Свинец и его неорганические соединения	0,01/0,005*	0,001		
Титан и его оксиды	10	—	4	
Торий	0,05	—	1	
Углерода оксид	20	5/3	4	П
Феррохром металлический	2	—	3	A
Фтористый водород	0,5/0,1*	0,02	2	П
Фтористо-водородной кислоты соли (хорошо растворимые в воде)	0,2	0,03	1	A
Хромовый ангидрид, хроматы, бихроматы	0,01	—		
Цинка оксид	0,5	0,05	2	

\* Среднесменные величины ПДК.

**Примечания.** 1. ПДК для атмосферного воздуха, указанные в числителе, являются максимально разовыми, а в знаменателе и без дроби – среднесуточными.

2. П – пары и/или газы; А – аэрозоли.

### 18.3. Допустимые уровни шума на рабочих местах

Уровни звукового давления, дБ (нижняя строка), на среднегеометрических частотах октавных полос, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

**Примечание.** Для тонального и импульсного шумов, а также для шума систем вентиляции и кондиционирования воздуха допустимые уровни на 5 дБ и дБА меньше табличных значений.

### 18.4. Допустимые уровни напряженности МП

Время воздействия, ч	Напряженность МП, А/м		
	непрерывных и прерывистых с $\tau_{ii} \geq 0,02$ с; $t_{pi} \leq 2$ с	прерывистых с $60$ с $\geq \tau_{ii} \geq 1$ с; $t_{pi} > 2$ с	прерывистых с $0,02$ с $\leq \tau_{ii} < 1$ с; $t_{pi} > 2$ с
1,0	6000	8000	10 000
1,5	5500	7500	9500
2	4900	6900	8900
2,5	4500	6500	8500
3,0	4000	6000	8000
3,5	3600	5600	7600
4,0	3200	5200	7200
4,5	2900	4900	6900
5,0	2500	4500	6500
5,5	2300	4300	6300
6,0	2000	4000	6000
6,5	1800	3800	5800
7,0	1600	3600	5600
7,5	1500	3500	5500
8	1400	3400	5400

**Примечание.**  $\tau_{ii}$  и  $t_{pi}$  – длительность импульса и паузы между импульсами, с.

теплового излучения на рабочих местах – по СН 245–71 и ГОСТ 12.1.005–88\*; напряженность магнитных полей (МП) частотой 50 Гц – по санитарным нормам СН 2.2.4.723–98 (табл. 18.4); напряженность ЭМП радиочастот –

по ГОСТ 12.1.006–84\*; напряженность электрических полей токов промышленной частоты – по ГОСТ 12.1.002–84; уровни ионизирующих излучений – по нормам радиационной безопасности НРБ–99.

### 18.1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Оборудование для сварки и резки должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003–91, 12.2.049–80, 12.2.007.8–75\* и Правил устройств электроустановок. Конкретные виды работы и оборудование также должны отвечать ряду требований: электросварочные работы – ГОСТ 12.3.003–86\*; газовая сварка и резка – ГОСТ 12.3.036–84\*; плазменная сварка и резка – ГОСТ 12.3.039–85\*; УЗС – ГОСТ 12.1.001–89; лазерная сварка и резка – Санитарным нормам и правилам 5804–91.

### 18.1.4. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

**Требования к помещениям, приведенные в государственных стандартах.** Объем производственного помещения на одного работающего должен быть  $\geq 15 \text{ м}^3$ , а площадь  $\geq 4,5 \text{ м}^2$ , исключая площадь, занимаемую оборудованием и проходами.

Для уменьшения вредного влияния яркости сварочной дуги и снижения контраста между дугой и окружающими предметами цветовую отделку интерьера помещений, оборудования цехов и участков электродуговых методов

сварки нужно выполнять в светлых тонах (серый, желтый, голубой) с диффузным отражением света, применяя цинковые и титановые белила и желтый крон для поглощения УФ излучения.

Ворота и проемы для транспортирования длинномерных заготовок и сварных изделий, открываемые не менее чем на 40 мин в смену, должны быть оборудованы воздушными или воздушно-тепловыми завесами, исключающими поступление в помещение холодного воздуха.

Полы в помещениях должны быть нескользящие и нескользкие, обладать малой теплопроводностью.

В помещениях для плазменной резки необходима звукопоглощающая облицовка стен высотой  $\geq 2,7 \text{ м}$ .

Лазеры IV кл. должны размещаться в специальном помещении с устройством блокировки входной двери. Двери помещений для лазеров III, IV кл. должны быть оборудованы внутренними замками, табло «Посторонним вход воспрещен» и знаком лазерной опасности (для лазеров II – IV кл.). Искусственное освещение помещений должно соответствовать Правилам ПОТ Р М-020–2001 и СНиП 23-05-95 (табл. 18.5).

## 18.5. Рекомендуемые показатели освещения сварочных и сборочно-сварочных цехов при использовании газоразрядных ламп

Вид работы	Разряд зрительной работы	Освещенность, лк		Показатель ослепленности	Коэффициент пульсации, %, не более
		комбинированное освещение	общее освещение		
Сварка и пайка материалов и металлов толщиной, мм:	Iв	2500	750	20	20/10
– <0,06					
– 0,06...0,5		2000	500		
– 0,5...1,5		1250	400		10/15
Сварка, наплавка и резка средних и крупных изделий (ручная, механизированная, КС и т.д.)	IVa	750	300	40	20
Контроль сварного соединения (шва)	IIIa	2000	500		20/15
Управление механизированными и автоматизированными сварочными устройствами	IIIб	1000	300		

**Примечание.** В числителе указан коэффициент пульсации для системы комбинированного освещения, а в знаменателе – для общего.

Общее равномерное освещение должно устраиваться в цехах, где проводятся сборочно-сварочные работы крупных изделий. Комбинированное освещение следует предусматривать при работах высокой и наивысшей точности (I – III разр.), в частности при сварке и пайке материалов толщиной 0,06...0,5 мм, при дефектоскопии сварных швов и других подобных работах.

Для освещения цехов надо использовать, как правило, газоразрядные источники света: лампы ДРЛ, ДРИ; для освещения высоких цехов (до 4 м) большой площади – люминесцентные лампы. Допускается применение ламп накаливания. Для местного освещения рекомендуются светильники с непрозрачными отражателями, имеющими защитный угол  $\geq 30^\circ$ . Если светильники расположены ниже глаз сварщика, то защитный угол может быть в пределах 10...30°.

При сварке внутри емкостей освещение осуществляется светильниками направленного света, установленными вне свариваемого объекта, или ручными переносными светильниками, оборудованными защитной сеткой. Освещенность в этих случаях должна быть  $\geq 30$  лк. При этом трансформатор для переносных светильников нужно устанавливать вне свариваемого объекта с обязательным заземлением вторичной обмотки трансформатора. Не допускается применение автотрансформаторов.

В производственных помещениях сварочных и сборочно-сварочных цехов параметры микроклимата следует принимать по ГОСТ 12.1.005–88\* (помещения с незначительными избытками явной теплоты, работы средней тяжести категорий IIa и IIb).

В холодный период года допустимые параметры микроклимата для работ IIa и IIb соответственно равны: температура воздуха 17...23 и 15...21 °C, относительная влажность  $\leq 75\%$ , скорость движения воздуха  $\leq 0,3$  и 0,4 м/с. В теплый период эти параметры равны 18...27 и 16...27 °C, 65 и 70 %, 0,2...0,4 и 0,2...0,5 м/с.

#### 18.1.5. РАЗМЕЩЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧИХ МЕСТ

Соответствующие требования приведены в ГОСТ 12.2.061–81 и в государственных стандартах на отдельные виды работ (см. разд. 18.1.3).

Ширина проходов между оборудованием, движущимися механизмами, перемещаемыми деталями, стационарными многопостовыми источниками питания должна быть  $\geq 1,5$  м, а между однопостовыми  $\geq 0,8$  м. Ширина проходов между машинами КС должна быть в пределах 1,3 м в зависимости от их взаимного расположения. На каждое стационарное рабочее место при плазменной и газоплазменной обработке металлов должно отводиться  $\geq 4$  м<sup>2</sup>, а при работе в кабине  $\geq 3$  м<sup>2</sup>. Проходы – шириной  $\geq 1$  м.

Зоны с опасными производственными факторами должны быть ограждены, знаки безопасности выдержаны по ГОСТ 12.4.026–76\*.

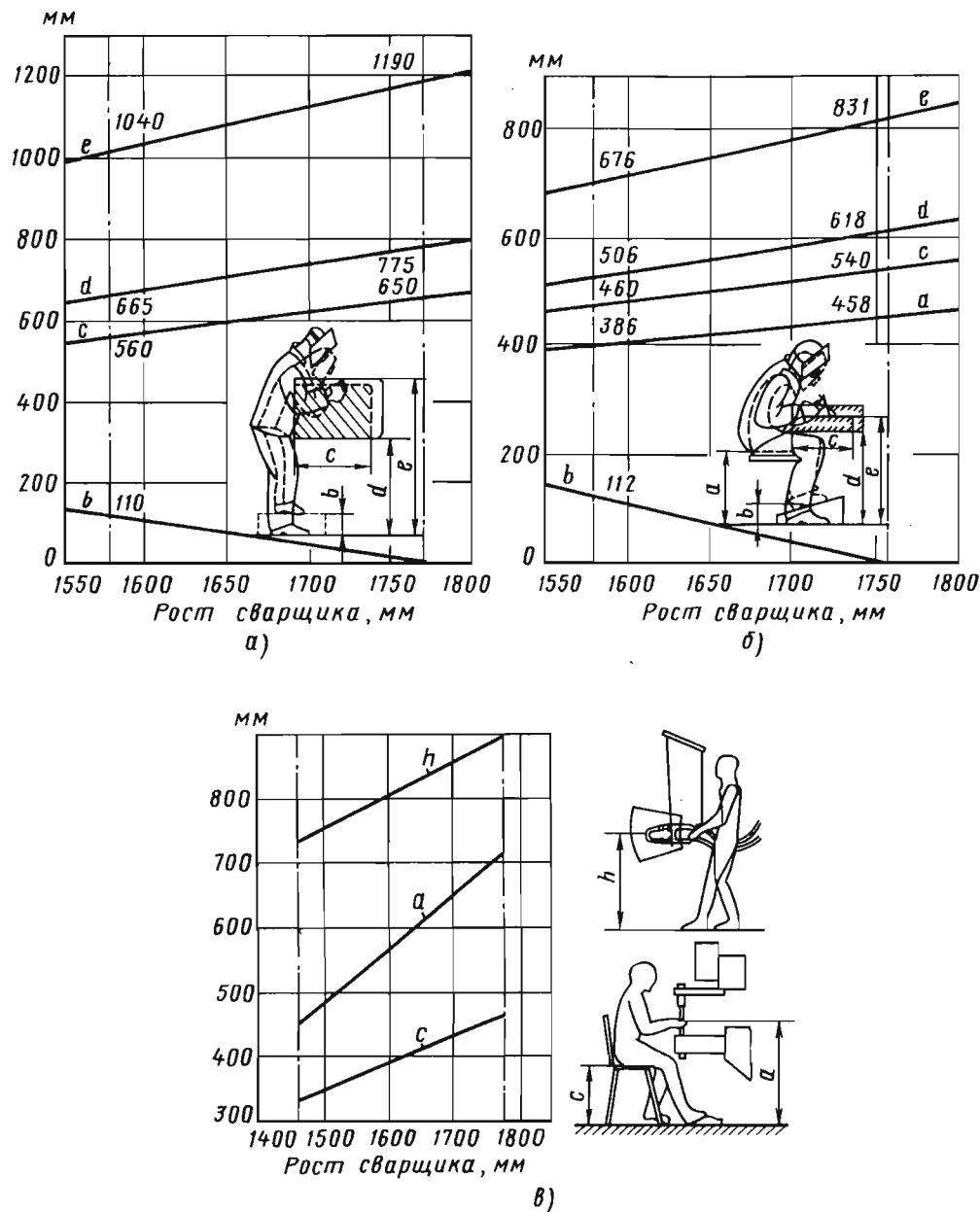
Организация рабочих мест должна удовлетворять эргономическим требованиям ГОСТ 12.2.032–78 и 12.2.033–78 (рис. 18.1).

#### 18.1.6. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЗАГОТОВКИ

Исходные материалы должны соответствовать маркам и требованиям, указанным в технологии. Не допускается применять сварочные материалы, не имеющие санитарно-гигиенической оценки, а также вольфрамовые прутки ВТ и другие материалы, выделяющие радиоактивные вещества.

Сварочные материалы должны храниться в крытых сухих помещениях при отсутствии в воздухе складских помещений паров кислот, щелочей и других агрессивных веществ. Перед началом работы сварочные материалы надо прокалить или просушить при режимах, рекомендуемых для данного материала. В холодный период года материалы и заготовки следуют подавать в цех заранее с тем, чтобы к началу сварки их температура была не ниже температуры в цехе.

Поверхности свариваемых заготовок, деталей и сварочных проволок должны быть сухими, очищенными от окалины, смазки, ржавчины и других загрязнений. Кромки заготовок не должны иметь заусенцев. Обезжиривание поверхностей под сварку следует проводить растворителями, допущенными к применению органами санитарного и пожарного надзора. Запрещается для этих целей использовать дихлорэтан, трихлорэтилен и другие хлорированные углеводороды, а также протирать растворителями нагретые изделия.



**Рис. 18.1. Параметры стационарных рабочих мест:**  
**а и б – работа при ручной дуговой сварке стоя и сидя; в – работа при контактной сварке**

Поверхности свариваемых и наплавляемых изделий, покрытые антикоррозионными грунтами, необходимо очищать от грунта по ширине  $\geq 100$  мм от места сварки. Хранение,

перевозка и эксплуатация баллонов со сжатыми газами регламентируется Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

### 18.1.7. ПОЖАРО- И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

Сварочные и другие работы должны проводиться в соответствии со СНиП 21.01-97, СНиП II-90-81 и Правилами пожарной безопасности в Российской Федерации ППБ-01-93. Категории производств по взрывной, пожаро-взрывной и пожарной опасности следует принимать по специальным ведомственным перечням. Цехи и участки, где ведутся работы по дуговой сварке, газовой сварке и резке металлов, относятся к категории Г производств по пожарной и взрывной опасности. Число огнетушителей и других первичных средств пожаротушения для таких цехов и участков требуется выбирать по упомянутым типовым правилам, а именно: на 600...800 м<sup>2</sup> площади цеха необходимо наличие одного углекислотного огнетушителя ОУ-2 или ОУ-5, двух пенных ОХП-10, ящика с песком и лопатой, а также войлока, кошмы или асбеста (2 × 1,5 м).

Места, отведенные для сварочных работ, установки оборудования должны быть очищены от легковоспламеняющихся материалов в радиусе ≥5 м. Сварочные работы вне производственного помещения можно проводить только по согласованию с заводской пожарной охраной.

Запрещается сварка: свежеокрашенных конструкций до полного высыхания краски; сосудов, аппаратов, трубопроводов коммуникаций, находящихся под напряжением, избыточным давлением, заполненных горючими и токсичными материалами.

Вблизи хранилища карбида кальция должны быть размещены средства пожаротушения (сухой песок, углекислотные огнетушители, тетрахлорные или порошковые огнетушители). Места хранения карбида кальция необходимо снабдить хорошо видимыми плакатами следующего содержания: «Не использовать воду для тушения пожара», «Для открытия барабанов использовать неискрящиеся инструменты» и т.д.

### 18.1.8. ПЕРСОНАЛ

К работам по сварке и резке допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие квалификационное удостоверение. Повторный инструктаж и проверка знаний по охране труда проводятся не реже одного раза в квартал.

Сварщики, выполняющие работы по изготовлению, монтажу и ремонту объектов котлонадзора, газового надзора и подъемных со-

оружений, подвергаются испытаниям согласно требованиям Правил аттестации сварщиков. При поступлении на работу сварщики обязаны проходить предварительные медицинские осмотры.

К самостоятельным работам на высоте ≥5 м допускаются сварщики III разр., обследованные медицинской комиссией и не имеющие противопоказаний терапевта, невропатолога, окулиста и отоларинголога. Особое внимание обращается на состояние вестибулярного аппарата. Женщины-сварщицы не допускаются к сварке в закрытых емкостях, на сооружениях (башнях, мачтах) высотой >10 м, к верхолазным работам, а также к плазменной сварке и резке. В период беременности и кормления детей женщины должны переводиться на работу, не связанную с процессами сварки.

Сварщики должны иметь квалификационную группу по технике безопасности не ниже II.

### 18.1.9. СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ (СИЗ)

Выбор спецодежды, спецобуви, СИЗ органов дыхания (СИЗ ОД), глаз и головы проводят исходя из методов сварки, условий труда, наличия опасных и вредных производственных факторов. Для правильного и быстрого выбора СИЗ они снабжаются эмблемами (рис. 18.2): T<sub>o</sub> – от открытого огня; T<sub>p</sub> – от искр, брызг расплавленного металла, окалины; T<sub>u</sub> – от теплового излучения; T<sub>n</sub> – от контакта с нагретыми поверхностями (T<sub>n</sub> 100 – от 40 до 100 °C; T<sub>n</sub> 400 – от 100 до 400 °C); T<sub>h</sub> – от пониженных температур воздуха. Более подробное описание СИЗ можно найти в литературе.

При работах на открытом воздухе и в неотапливаемых помещениях в холодное время года сварщикам должна выдаваться одежда в комплекте с утепленными прокладками в зависимости от климатических зон, а для защиты от соприкосновения с влажной, холодной землей, снегом – подстилки, наколенники из огнестойких материалов с эластичной прослойкой. Для защиты рук используются брезентовые рукавицы по ГОСТ 12.4.010–75\*, то же с крагами, а также рабочие рукавицы из спилка с крагами и без них. Для защиты ног используются полусапоги и юфтевые сапоги с укороченными голенищами, а также специальная обувь, при этом запрещается работать в обуви с открытой шнурковкой или металлическими гвоздями в подошве. При сварке, выполняемой

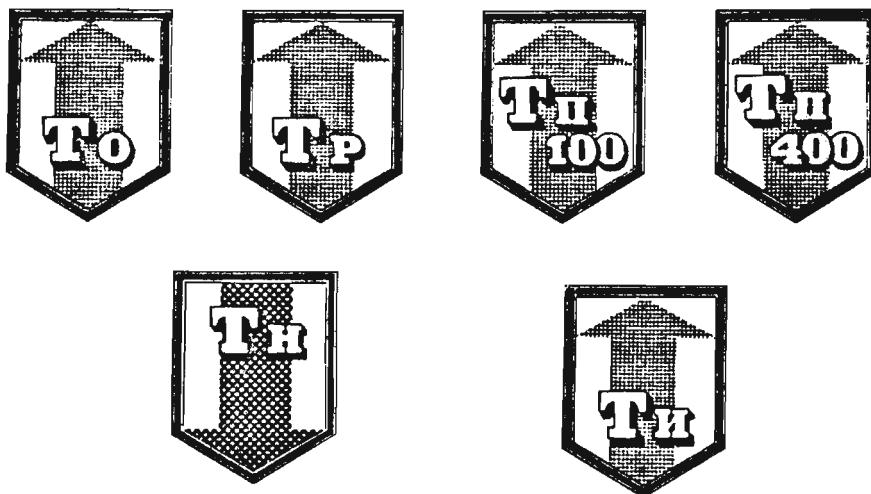


Рис. 18.2. Эмблемы СИЗ

сидя, на коленях или лежа, в условиях повышенной опасности поражения электрическим током при отсутствии автоматического отключения напряжения холостого хода, а также в особо опасных помещениях сварщики кроме спецодежды должны быть обеспечены диэлектрическими перчатками и ковриками.

Защитные щитки для электросварщиков изготавливаются по ГОСТ 12.4.035–78\*, а светофильтры выбираются по табл. 18.6.

Очки для защиты глаз (ГОСТ 12.4.013–85) при газовой и лазерной сварке и резке и вспомогательных работах при электросварке выбираются по табл. 18.7, светофильтры – по табл. 18.8. Марки стекол для противолазерных очков приведены в табл. 18.9. Для защиты органов слуха должны применяться противошумовые наушники и вкладыши «Беруши».

СИЗ ОД сварщиков применяются в тех случаях, когда общебменная и местная вентиляции не обеспечивают требуемую чистоту воздуха в РЗ; чаще всего это сварка в полузамкнутых и замкнутых конструкциях. Они подразделяются на фильтрующие и изолирующие. Фильтрующие должны применяться при повышенной объемной доле ВВ в воздухе в условиях достаточного для дыхания содержания кислорода ( $\geq 18\%$ ), а изолирующие – при недостаточном содержании кислорода или невозможности обеспечить защиту фильтрующими СИЗ ОД, причем подаваемый в зону

дыхания воздух должен быть очищен от вредных примесей и иметь температуру 15...20 °C.

#### 18.1.10. ТРЕБОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

При работе сварочных цехов загрязнение окружающей среды происходит главным образом в результате выбросов в атмосферу вентиляционного воздуха и сточных вод в водоемы. Кроме того, имеют место загрязнение окружающей среды твердыми отходами, действие шума и другие вредные факторы.

*Выбросы в атмосферу.* Воздух, выбрасываемый в атмосферу из систем общеобменной и местной вентиляции сварочных цехов, содержащий ВВ, следует, как правило, очищать, а оставшееся количество – рассеивать в атмосфере. В соответствии с ОНД–86 концентрации ВВ в атмосфере от вентиляционных выбросов с учетом фоновых концентраций от других выбросов не должны превышать:

- предельно допустимых максимально разовых концентраций (ПДК) ВВ в атмосферном воздухе населенных пунктов (см. табл. 18.2);
- 0,3 ПДК ВВ для РЗ производственных помещений (ПДК<sub>РЗ</sub> по табл. 18.2) в воздухе, поступающем в эти помещения через приемные (воздухозаборные) устройства вентиляционных систем, а также окна и проемы, используемые для притока воздуха.

### 18.6. Светофильтры, рекомендуемые при дуговых методах сварки

Способ сварки	Сила тока, А / Тип светофильтра								
Дуговая металлическим электродом	$\frac{15}{\text{C-3}}$ ; $\frac{30}{\text{C-4}}$ ; $\frac{60}{\text{C-5}}$ ; $\frac{150}{\text{C-6}}$ ; $\frac{275}{\text{C-7}}$ ; $\frac{350}{\text{C-8}}$ ; $\frac{600}{\text{C-9}}$ ; $\frac{700}{\text{C-10}}$ ; $\frac{900}{\text{C-11}}$								
Дуговая тяжелых металлов металлическими электродами в инертных газах	$\frac{20}{\text{C-3}}$ ; $\frac{30}{\text{C-4}}$ ; $\frac{50}{\text{C-5}}$ ; $\frac{80}{\text{C-6}}$ ; $\frac{100}{\text{C-7}}$ ; $\frac{200}{\text{C-8}}$ ; $\frac{350}{\text{C-9}}$ ; $\frac{500}{\text{C-10}}$ ; $\frac{700}{\text{C-11}}$ ; $\frac{900}{\text{C-12}}$								
Дуговая легких сплавов металлическим электродом в инертных газах	$\frac{15}{\text{C-4}}$ ; $\frac{30}{\text{C-5}}$ ; $\frac{50}{\text{C-6}}$ ; $\frac{90}{\text{C-7}}$ ; $\frac{150}{\text{C-8}}$ ; $\frac{275}{\text{C-9}}$ ; $\frac{350}{\text{C-10}}$ ; $\frac{600}{\text{C-11}}$ ; $\frac{800}{\text{C-12}}$								
Дуговая вольфрамовым электродом в инертных газах	$\frac{10}{\text{C-3}}$ ; $\frac{15}{\text{C-4}}$ ; $\frac{20}{\text{C-5}}$ ; $\frac{40}{\text{C-6}}$ ; $\frac{80}{\text{C-7}}$ ; $\frac{100}{\text{C-8}}$ ; $\frac{175}{\text{C-9}}$ ; $\frac{275}{\text{C-10}}$ ; $\frac{300}{\text{C-11}}$ ; $\frac{400}{\text{C-12}}$ ; $\frac{600}{\text{C-13}}$								
Дуговая металлическим электродом в $\text{CO}_2$	$\frac{30}{\text{C-1}}$ ; $\frac{60}{\text{C-1}, \text{C-2}}$ ; $\frac{100}{\text{C-2}, \text{C-3}}$ ; $\frac{150}{\text{C-3}, \text{C-4}}$ ; $\frac{175}{\text{C-4}, \text{C-5}}$ ; $\frac{300}{\text{C-5}, \text{C-6}}$ ; $\frac{400}{\text{C-6}, \text{C-7}}$ ; $\frac{600}{\text{C-7}, \text{C-8}}$ ; $\frac{700}{\text{C-8}, \text{C-9}}$ ; $\frac{900}{\text{C-9}}$								
Плазменная	$\frac{30}{\text{C-5}}$ ; $\frac{50}{\text{C-6}}$ ; $\frac{100}{\text{C-7}}$ ; $\frac{175}{\text{C-8}}$ ; $\frac{300}{\text{C-9}}$ ; $\frac{350}{\text{C-10}}$ ; $\frac{500}{\text{C-11}}$ ; $\frac{700}{\text{C-12}}$ ; $\frac{900}{\text{C-13}}$								
Воздушно-дуговая поверхностная резка, строжка и наплавка	$\frac{500}{\text{C-11}}$ ; $\frac{700}{\text{C-12}}$ ; $\frac{900}{\text{C-13}}$								

Примечание. Для вспомогательных рабочих при электросварке в цехах должны применяться светофильтры В-1, В-2 и В-3.

### 18.7. Защитные очки (ЗО)

Условия труда	Назначение	Рекомендуемые типы ЗО
Газовая сварка и резка на открытых площадках при ярком солнечном освещении, вспомогательные работы в цехах	Защита глаз спереди и с боков от слепящей яркости видимого света, ИК и УФ-излучений и мелких твердых частиц	Открытые 02-76 со светофильтрами В-1 (для работы на открытых площадках и для вспомогательных рабочих при сварке в цехах) и В-2 (для вспомогательных рабочих при дуговой сварке в цехах)
Газовая сварка и резка, вспомогательные работы при дуговой сварке на открытых площадках		Откидные 002 со светофильтрами В-1 и В-2
Контроль за ходом автоматизированного процесса		Закрытые с непрямой вентиляцией ЗН5-72 и ЗН8-72 со светофильтрами Г-1 – Г-3 или С-1 – С-4
Газовая сварка и резка	То же, при чередующемся их воздействии	Открытые двойные со светофильтрами обозначения Г и В: ОД2-72 (Г-1 – Г-3), ОД2-72 (В-1)
	Защита глаз от рассеянного, диффузно отраженного и случайного попадания прямого излучения лазеров	Закрытые с непрямой вентиляцией ЗН-22-72-СЗС-22
Лазерная сварка и резка	Защита глаз от рассеянного, зеркально отраженного излучения лазеров	Двойные с непрямой вентиляцией ЗНД4-72-СЗС-22-ОС-23-1

### 18.8. Светофильтры для газовой сварки и резки

Светофильтр	Расход ацетилена при сварке, л/ч	Расход кислорода при резке, л/ч
C-1	≤70	<900
C-2	70...200	900...2000
C-3	200...800	2000...4000
C-4	≥800	4000...8000

### 18.9. Марки стекол, рекомендуемые для использования в противолазерных очках

Длина волны, мкм	0,48...0,51	0,53	0,69	0,84	1,06	1,54	10,6
Марка стекла	OC-12*, OC-13, OC-23-1	OC-12, OC-13, OC-23-21	C3C-21**, C3C-22	C3C-21, C3C-22	C3C-21, C3C-22, C3C-24	C3C-24, C3C-25, C3C-26	БС-15***

\* Оранжевое стекло.

\*\* Сине-зеленое стекло.

\*\*\* Бесцветное стекло.

Для каждого источника загрязнения атмосферы на предприятии устанавливаются предельно допустимые выбросы (ПДВ, мг/с, т/год) ВВ из условия, чтобы выбросы с учетом их рассеяния в атмосфере не создавали повышенных концентраций в жилой застройке. Расчет ПДВ ведут в соответствии с ОНД-86, а контроль – измерением концентраций ВВ в течение 20 мин в среднем за сутки, месяц, год.

*Сточные воды.* В состав сточных вод предприятия входят производственные сточные воды (в результате технологического процесса), бытовые стоки, атмосферные, образующиеся в результате смыва загрязнений на территории предприятия.

Расчет допустимого состава сточных вод проводится с учетом Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. Этими правилами установлены ПДК (мг/л) для большого количества ВВ (>400), состав и свойства воды водоемов, куда сбрасываются сточные воды (запах, цвет, значение показателя pH, наличие возбудителей заболеваний и др.). Правилами запрещается сбрасывать в водоемы сточные воды, содержащие вещества, для которых не установлены ПДК; с содержанием ценных отходов, которые можно утилизировать, а также – если можно избежать сброса, используя более рациональную технологию, безводные процессы и системы обратного водоснабжения.

Расход воды ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) для охлаждения сварочного оборудования определяется из его паспортных данных или по табл. 18.10.

*Твердые отходы и их утилизация.* Такими отходами сварочного производства являются: огарки электродов, шлак, окалина, остатки сварочных материалов и др. Технологические процессы проектируют с учетом получения минимальных отходов на основных и вспомогательных операциях.

Выбор необходимых мероприятий по механизации уборки и транспортированию отходов необходимо проводить в зависимости от вида отходов и их количества.

Неиспользованные отходы обычно рассортировывают по маркам сварочных материалов и габаритным размерам. Хранят твердые отходы в специальных контейнерах.

Утилизируют неиспользованные в сварочном производстве отходы, используя их в металлургии.

## 18.10. Расход воды

Сварочное оборудование	Расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$ на ед. оборудования
<b>Машина:</b>	
– КС мощностью:	
200 кВ · А	0,8
630 кВ · А	1,2
– многоэлектродной с числом электродов:	
до 48	5,0
до 96	10,0
<b>Работы:</b>	
– КС (клещи со встроенными трансформаторами)	0,6
– дуговой сварки при силе тока >500 А	0,1

*Энергетические загрязнения.* Такими загрязнениями окружающей среды являются ионизирующие излучения, шум и инфразвук.

В соответствии с НРБ-99 допустимая мощность дозы для населения при внешнем облучении (гамма- и рентгеноскопия сварных швов) составляет 0,1 мкР/ч.

Допустимые уровни шума для жилой и общественной застройки приведены в санитарных нормах СН 2.2.4/2.1.8.562-96. В частности, шум систем вытяжной вентиляции сварочного цеха не должен превышать допустимых уровней звука на территории жилой застройки  $L_A = 50 \text{ дБА}$  (с 7 до 23 ч) и 40 дБА (с 23 до 7 ч).

Допустимые уровни инфразвука в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8, 16 Гц на территории жилой застройки должны быть соответственно не более 90, 85, 80, 75 дБ.

## 18.2. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

### 18.2.1. ВЕНТИЛЯЦИЯ

*Общеобменная вентиляция.* Расход приточного воздуха  $L_{\text{пр}}$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) общеобменной вентиляции определяется по формуле

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{МО}} + L_{\text{выт}},$$

где  $L_{\text{МО}}$  и  $L_{\text{выт}}$  – расходы воздуха, удаляемые из помещения местными отсосами (см. ниже) и вытяжной вентиляцией,

$$L_{\text{выт}} = [m_{\text{ВВ}} - L_{\text{МО}}(q_{\text{РЗ}} - q_{\text{пр}})] / (q_{\text{выт}} - q_{\text{пр}}),$$

где  $m_{\text{ВВ}}$  – масса каждого из ВВ, поступающих в помещение (мг/ч), определяемая по табл. 18.11 в зависимости от расходуемых сварочных материалов и проводимых работ: при сварке  $m_{\text{ВВ}} = 1000mZ_b$  [здесь  $m$  – масса (кг) расходуемого сварочного материала в час;  $Z_b$  – валовые выделения ВВ (г/кг)]; при КС

$m_{\text{ВВ}} = 1000nZ_m$  [здесь  $Z_m$  – выделения ВВ (г/ч) на одну машину;  $n$  – их количество]; при резке  $m_{\text{ВВ}} = 1000lZ_l$  [здесь  $l$  – длина реза, м/ч;  $Z_l$  – выделения ВВ, г/м];  $q_{\text{РЗ}}$ ,  $q_{\text{пр}}$  и  $q_{\text{выт}}$  – соответственно концентрации ВВ в РЗ, мг/м<sup>3</sup> ( $q_{\text{РЗ}} = \text{ПДК}$ ); приточном воздухе ( $q_{\text{пр}} \leq 0,3 \text{ ПДК}$ ) и вытяжном ( $q_{\text{выт}} > q_{\text{РЗ}}$ ). Последняя определяется в зависимости от места удаления ВВ общеобменной вытяжной вентиляцией, а  $Z_l$  и  $Z_m$  берутся из работы [1].

### 18.11. Валовые выделения ВВ

Технологические процессы	Укрупненные удельные показатели, г/кг сварочного материала		
	пыль	оксид углерода	оксиды азота
Автоматическая и механизированная сварка:			
– плавящимся электродом в углекислом газе	11 %	2,7	0,06
– под слоем флюса	10,5		–
– стали под керамическими флюсами	20,1		
Ручная электродуговая сварка:			
– электродами рудно-кислого типа (марганцевое покрытие)	12,4		1,8
– электродами рутилового или рутилкарбонатного типа	10,0		
– электродами с фтористо-кальциевым покрытием	12,4		
– порошковой проволокой	10,0		–
Сварка алюминия и сплавов на его основе плавящимися электродами в аргоне	17,8		
Сварка титановых сплавов	4,7		
Электрошлаковая сварка	5,5		
Газовая сварка сталей (на 1 кг ацетилена)	22,0		
Наплавка стали	15,0		
Плазменное напыление алюминия (на 1 кг порошка)	77,5		
Металлизация стали цинком (на 1 кг проволоки)	96,0		

1. При удалении воздуха за пределами РЗ

$$q_{\text{выт}} = q_{\text{пр}} + K_z (\text{ПДК} - q_{\text{пр}}),$$

где коэффициент воздухообмена  $K_z$  принимается равным 0,9...1,1 при подаче воздуха в помещение горизонтальными струями; 1,65...1,85 для приколонной подачи в РЗ и 1,25...1,4 на высоте 4 м. Большие значения  $K_z$  следует принимать для кратности воздухообмена порядка трех, а меньшие – десяти.

2. При удалении воздуха из РЗ  $q_{\text{выт}} = q_{\text{РЗ}}$

$$L_{\text{пр}} = m_{\text{ВВ}} / (q_{\text{выт}} - q_{\text{РЗ}}).$$

3. При удалении воздуха из верхней зоны помещения и отсутствии местной вентиляции ( $L_{\text{МО}} = 0$ )

$$L_{\text{пр}} = m_{\text{ВВ}} / [K_z (q_{\text{РЗ}} - q_{\text{пр}})].$$

Значения  $K_z$  здесь те же, что и в первом случае.

При одновременном выделении в воздух РЗ нескольких ВВ однонаправленного действия (оксидов азота и марганца и др.) общеобменную вентиляцию следует рассчитывать суммированием расходов воздуха, необходимых для разбавления каждого ВВ в отдельности до его ПДК с учетом загрязнения приточного воздуха. При этом допустимыми нужно принимать такие концентрации  $C$  ВВ, которые отвечают формуле

$$C_1 / \text{ПДК}_1 + C_2 / \text{ПДК}_2 + \dots + C_n / \text{ПДК}_n \leq 1.$$

При одновременном выделении нескольких ВВ, не обладающих однонаправленным действием, проектный расход воздуха следует принимать по тому веществу, для которого требуется подача наибольшего объема чистого воздуха.

Раздачу приточного воздуха нужно осуществлять:

- рассеянно в РЗ помещений, в основном на несварочные участки – при сварке в защитных газах, а также там, где вытяжная вентиляция осуществляется МО;
- сосредоточенно в верхнюю зону помещения – в остальных случаях.

При плазменной обработке металлов сжиженными газами и отсутствии МО 2/3 воздуха следует удалять из нижней зоны помещений и 1/3 из верхней.

В соответствии со СНиП 2.04.05–91\* минимальный расход приточного воздуха должен быть 20...30 м<sup>3</sup>/ч на одного человека в поме-

щениях с естественным проветриванием и 60 м<sup>3</sup>/ч без него. Поэтому величина  $L_{\text{пр}} / N$  ( $N$  – число работающих) должна быть не менее этих значений минимального расхода.

*Местная вытяжная вентиляция.* Наибольшее распространение получили МО, максимально приближенные к источнику ВВ и расположенные таким образом, чтобы сварочная пыль и газы отклонялись от лица сварщика. Для оценки эффективности МО используется величина  $\eta_{\text{МО}} = m_{\text{МО}} / m_{\text{ВВ}}$ , где  $m_{\text{МО}}$  – количество ВВ, удаляемых МО. Необходимо, чтобы  $\eta_{\text{МО}} \geq 0,75$ . Оставшееся количество ВВ должно разбавляться до ПДК общеобменной вентиляцией.

Расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч, удаляемого МО

$$L = 3600 F_o v_o,$$

где  $F_o$  – площадь всасывающего отверстия отсоса, м<sup>2</sup>;  $v_o$  – скорость воздуха в этом отверстии, м/с.

Площадь  $F_o$  и его форму выбирают из конструктивных соображений в зависимости от вида сварки или резки, используемого оборудования и т.д. Скорость  $v_o$  находится из условий обеспечения заданной скорости воздуха  $v_x$  в зоне сварки или резки на расстоянии  $x$  (в м) от центра всасывающего отверстия.

Величина  $v_x$  должна быть (м/с):

- при ручной сварке  $\geq 0,5$ ;
- при сварке в углекислом газе  $\leq 0,5$ ;
- при сварке в инертных газах  $\leq 0,3$ ;
- при газовой и плазменной резке титановых сплавов и низколегированных сталей – соответственно  $\geq 1,0$  и  $1,4$ ;
- при плазменной резке алюминиево-магниевых сплавов и высоколегированных сталей  $\geq 1,8$ ;
- при плазменном напылении  $\geq 1,3$ ;
- при заточке торированных вольфрамовых электродов  $\geq 1,3$ .

Для МО простейшей формы скорость  $v_o$  определяются по следующим формулам:

- для круглых и квадратных отверстий без экрана

$$v_o = 16 v_x (x/d)^2;$$

- то же, с экраном

$$v_o = 8 v_x (x/d)^2,$$

где  $d$  – диаметр круглого отверстия или гидравлический диаметр для квадратного отверстия, м;

для прямоугольного отверстия щелевидной формы шириной  $b$

$$v_0 = 6v_x x / b.$$

При  $x < 0,5d$  и  $x < 0,5b$  для определения  $v_0$  можно использовать графики, показанные на рис. 18.3, где приведены спектры относительных скоростей всасывания  $\bar{v} = v_x / v_0 \cdot 100\%$  для различных всасывающих отверстий ( $a$  и  $g$  – круглое и кольцевое отверстия;  $b$ ,  $e$  – отверстия

щелевидной формы с соотношением сторон  $1 : 10$  при горизонтальном расположении воздуховода на плоскости и в пространстве). В этих случаях  $v_0 = 100 v_x / \bar{v}$ .

Для щелевых и круглых отверстий, расположенных вблизи ограничивающих поверхностей,

$$v_0 = 100v_x / \bar{v}\psi,$$

где  $\psi$  см. на рис. 18.3,  $d$ .

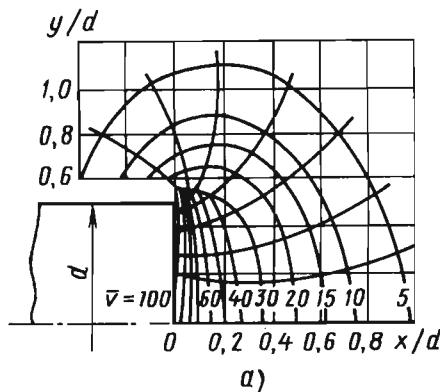
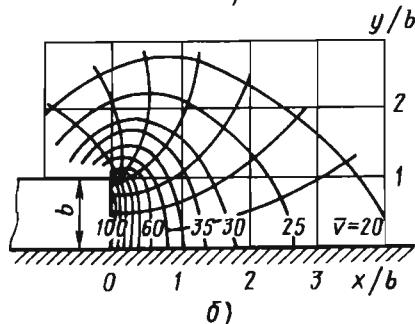
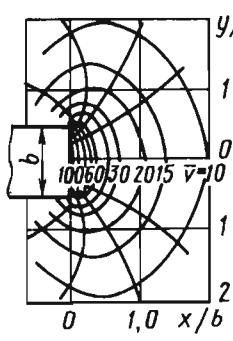
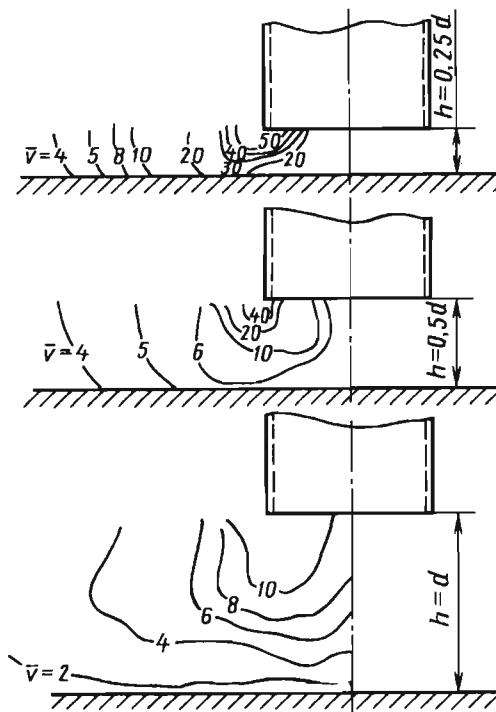
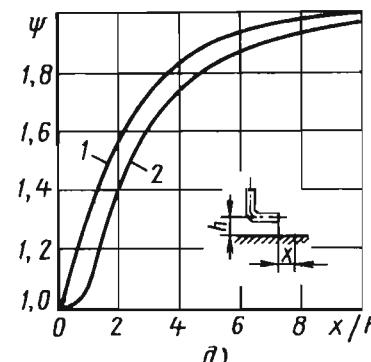
*a)**b)**e)**z)**d)*

Рис. 18.3. Графики для определения относительной скорости всасывания:  
1 и 2 – щелевидное и круглое отверстия

Для ручной и механизированной сварки мелких изделий применяют сварочные столы (ССН-1, С100 и др.) со встроенным МО, выпускаемые в двух вариантах: со встроенным вентилятором (рис. 18.4, а) и для присоединения к цеховой системе местной вытяжной вентиляции.

На стационарных сварочных постах применяют вытяжные панели (рис. 18.4, б, в). Расход воздуха определяется из расчета  $3300 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$  площади панели.

При сварке изделий длиной до 2...3 м используют подъемно-поворотные воздухоприемники.

При сварке в замкнутых объемах вытяжка воздуха осуществляется через гибкий шланг, присоединенный к всасывающему воздуховоду цеховой вытяжной системы. Возможна подача воздуха под маску сварщика, равная 110...140 л/мин.

При сварке под флюсом применяют щелевидные воронкообразные воздухоприемники (рис. 18.5), устанавливаемые на высоте 40...50 мм над поверхностью флюса. Расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{ч}$ )  $L = 12\sqrt[3]{I}$ , где  $I$  – сила сварочного тока, А.

Схемы воздухоприемников, встроенных в сварочные горелки при механизированной сварке в  $\text{CO}_2$ , показаны на рис. 18.6. Побудителями движения в МО при сварке в защитных газах чаще всего являются водокольцевые вакуум-насосы типа ВВН.

**Пример расчета.** Определить расход воздуха, удаляемого от установки автоматической сварки в  $\text{CO}_2$ .

Воздухоприемник выполнен в виде цилиндрической воронки со всасывающим отверстием диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  ( $F_0 = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ) и располагаем его на высоте  $h = 50 \text{ мм}$  над свариваемым изделием. Расстояние по горизонтали от точки сварки до оси приемника  $x = 50 \text{ мм}$ . Допустимая скорость воздуха у точки сварки  $v_x = 0,5 \text{ м/с}$ .

Расход удаляемого воздуха определяем по приведенным выше формулам. Скорость  $v_0 = 100v_x/\bar{v}\psi$ , где относительная скорость  $\bar{v} = 5 \text{ м/с}$  при  $x/d = 1$  (см. рис. 18.3, а), коэффициент  $\psi = 1,1$  при  $x/h = 1$  (см. рис. 18.3, д).

$$L = 3600 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 0,5 / (5 \cdot 1,1) = 64 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Машины КС мощностью до 150 кВ · А должны быть оборудованы МО, а машины с непрерывным оплавлением мощностью 150...500 кВ · А – вытяжными шкафами-укрытиями.

При ручной и машинной термической резке применяют раскроечные столы со встроенными секционными МО, расположенными с одной стороны при ширине стола до 1,5 м и с двух сторон или внутри, вдоль оси стола, при ширине >1,5 м. Расход удаляемого воздуха  $L = L_1 F (n_{вкл} + 0,1 n_{откл})$ , где  $L_1$  – расход воздуха, удаляемого с  $1 \text{ м}^2$  площади раскроечного стола;  $L_1 = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$  – при газовой резке;  $L_1 = 4000 \text{ м}^3/\text{ч}$  – при плазменной резке;  $F$  – площадь стола, обслуживаемого одной секцией МО;  $n_{вкл}$  и  $n_{откл}$  – число одновременно включенных и отключенных секций МО.

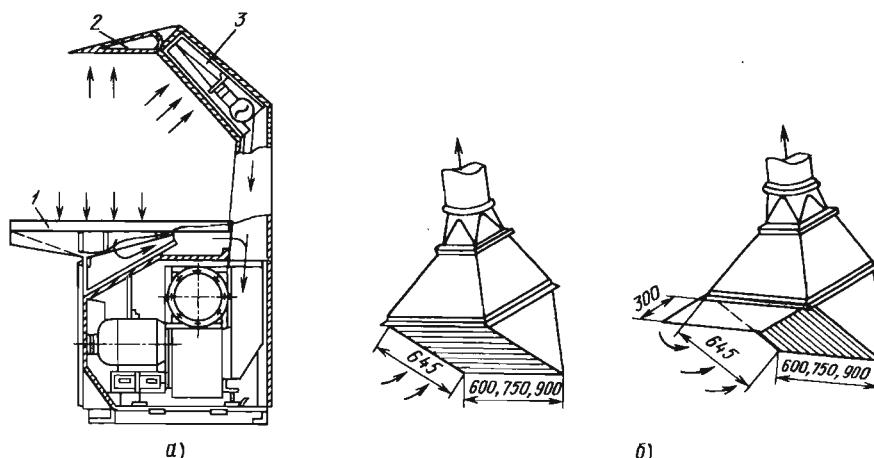


Рис. 18.4. Сварочные столы (а) и вытяжные панели (б):

1 – нижняя всасывающая решетка; 2 – поворотный козырек; 3 – наклонная панель равномерного всасывания

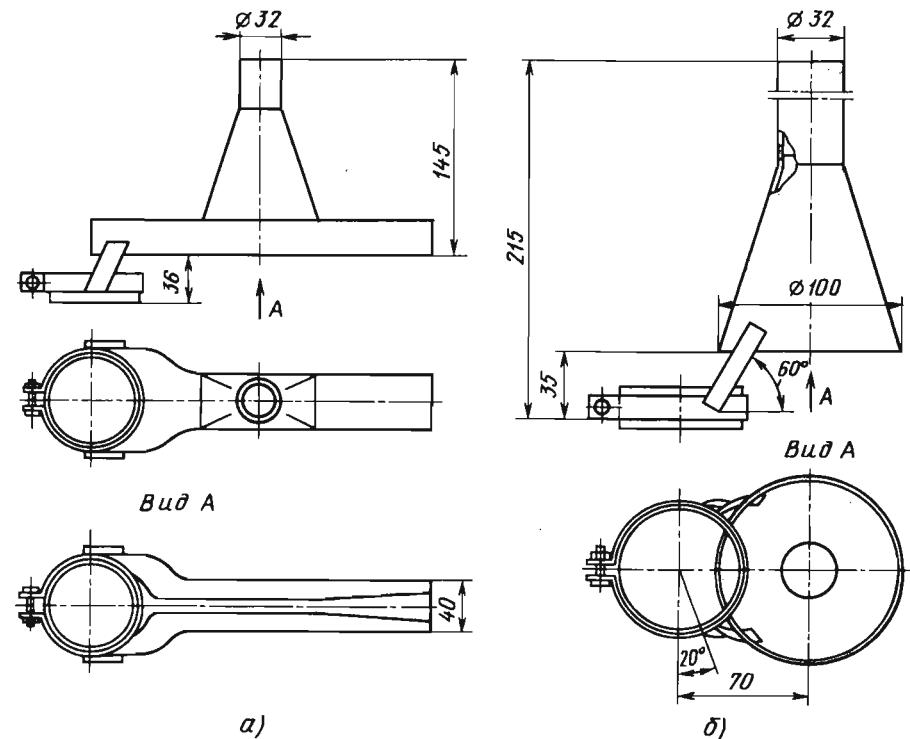


Рис. 18.5. Воздухоприемники при сварке под флюсом

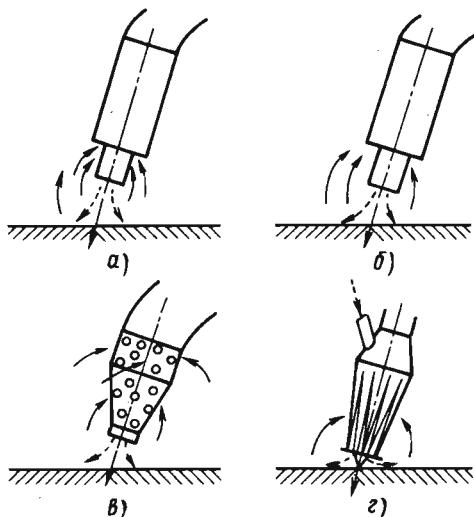


Рис. 18.6. Воздухоприемники при сварке в СО<sub>2</sub>:  
а и б – соответственно кольцевой симметричный и  
асимметричный; в – конический дырчатый;  
г – конусно-щелевидный;  
← – отсасывающий азотол;   
↔ – защитный газ

#### 18.2.2. ЗАЩИТА ОТ ВИБРАЦИЙ, ШУМА И УЛЬТРАЗВУКА

**Защита от вибраций.** Средства защиты от вибраций делятся на: 1) коллективные; 2) индивидуальные. К коллективным относятся средства, воздействующие на источник возбуждения и снижающие вибрации на пути их распространения. Первые из них – это: динамическое уравновешивание, изменение характера возмущающих воздействий, а также конструктивных элементов источника возбуждения, изменение частоты колебаний с целью отстройки от резонанса. Ко вторым относятся средства виброизоляции, вибродемпфирования и динамического виброгашения, расчет которых приведены в справочной литературе.

**Виброизоляция.** Применяют пружинные, резиновые и комбинированные виброизоляторы. Целью расчета средств виброизоляции является определение числа и типа стандартных виброизоляторов (АКСС М, АКСС И, КВ и др.), виброизолирующих опор или числа и параметров пружин, резиновых прокладок для снижения уровня виброскорости  $L_v$ , дБ, на

рабочих местах до допустимой по ГОСТ 12.1.012–90<sup>\*</sup> величины  $L_{v_{\text{доп}}}$ , т.е. требуемое снижение вибраций

$$\Delta L_v = L_v - L_{v_{\text{доп}}}.$$

Исходной предпосылкой для расчета является необходимость выполнения условия  $f/f_o = 3\dots 4$ , где  $f$  – частота колебаний возмущающей силы, Гц ( $f = n / 60$ , где  $n$  – частота вращения машины, мин<sup>-1</sup>);  $f_o = \sqrt{K/m} / (2\pi)$  – собственная частота колебаний машины, установленной на виброизоляторы ( $m$  – масса машины, кг;  $K$  – суммарная жесткость виброизоляторов). Данное отношение частот соответствует оптимальной по коэффициенту передачи.  $K_p = [(f/f_o)^2 - 1]^{-1}$  и эксплуатационным характеристикам виброизоляции.

Снижение уровня виброскорости, в дБ, при установке виброизоляторов

$$\Delta L_v = 20 \lg (1/K_p).$$

При низкочастотных вибрациях, а также неблагоприятных условиях эксплуатации (наличие масел, кислот, щелочей и др.) рекомендуется использовать пружины, а при высокочастотной вибрации – резиновые прокладки. Во всех случаях необходимо обеспечить требуемую статическую осадку ( $m$ ) виброизоляторов  $x_{\text{ст}} = 0,25 / f_o^2$ .

Для резиновых прокладок требуемая высота прокладок  $h = x_{\text{ст}} E / \sigma$ , где  $E$  и  $\sigma$  – динамический модуль упругости и допустимая нагрузка на сжатие используемой резины, Н/м<sup>2</sup>. Значение  $h$  должно отвечать условию  $h < n\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны изолируемых колебаний, м;  $n = 1, 2, 3\dots$

Площадь прокладки  $S = 9,81m / (\sigma N)$ , где  $N$  – число прокладок (обычно четыре). Ширина прокладки  $B = (1\dots 8)h$ .

Расчет пружинного виброизолятора сводится к определению диаметра проволоки пружины  $d$ , м, и числа витков  $i$  по формулам  $d = 16mgr / (\pi R_S)$ ,  $i = d^4 G / (64r^3 q)$ , где  $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;  $r$  – средний радиус пружины, м;  $R_S$  – допустимое напряжение на кручение (для стали  $R_S = 4,22 \cdot 10^6$  Па);  $G$  – модуль сдвига ( $G = 7,84 \cdot 10^{10}$  Па);  $q$  – жесткость виброизолятора, Н/м.

Проверяется условие устойчивости пружины  $H_0 d \leq 5,1$ , где  $H_0 = (i - 0,5)d + i(h_w - d)$  – высота ненагруженной пружины, м;  $h_w$  – шаг пружины, м;  $h_w = D/4\dots D/2$ , где  $D$  – диаметр пружины, м.

**Вибродемпфирование.** Наибольшее распространение получили вибродемптирующие покрытия, эффективность которых определяется упруговязкими параметрами наносимого материала: коэффициентом потерь  $\eta$  и динамическим модулем упругости  $E$ .

В настоящее время применяются два типа вибродемптирующих покрытий: жесткие и мягкие. К жестким относятся твердые пластмассы и мастики, действие которых обусловлено их деформациями в продольном направлении (поверхности покрытия, параллельного металлической поверхности, на которую оно наносится). Динамический модуль упругости этих материалов  $E \approx 10^9 \text{ Н/м}^2$ . Акустический эффект в случае жестких покрытий обеспечивается на низких и средних частотах (в среднем до 1000 Гц). Действие мягких вибродемптирующих покрытий, к которым относятся резина, некоторые мастики и пластмассы, обусловлено главным образом деформациями покрытия по его толщине, которая должна быть не менее двух – пяти толщин металлической поверхности. Величина  $E$  у таких материалов  $\sim 10^7 \text{ Н/м}^2$ , а частотный диапазон их применения  $> 1000$  Гц.

Снижение вибраций и шума, достигаемое при нанесении вибродемптирующего покрытия, может быть ориентировочно определено по формуле  $\Delta L = 20 \lg (\eta_2 / \eta_1)$ , где  $\eta_2$  – коэффициент потерь металлической поверхности с покрытием;  $\eta_1$  – то же, поверхности без покрытия.

Коэффициент потерь  $\eta_2 \approx E_n (\sigma_n / \sigma_m)^2 / E_m$ , где  $E_n$ ,  $E_m$  – динамические модули упругости соответственно покрытия и металла, Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_n$ ,  $\sigma_m$  – толщина соответственно покрытия и металла, м.

Значения динамического модуля упругости и коэффициента потерь для различных вибродемптирующих материалов приведены в табл. 18.12. При расчете по данным формулам величины  $E_m$  и  $\eta_1$  для стали принимаются равными соответственно  $2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$  и  $10^{-3}$ .

### 18.12. Характеристики вибродемптирующих материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамический модуль упругости $E_p$ , Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент потерь η	Частотный диапазон эффективности снижения шума, Гц
Мастики:				До 1000
– ВД-17-58	1860	$6 \cdot 10^8$	0,44	
– ВД-17-59	1760	$8,2 \cdot 10^8$	0,3	
– ВД-17-63	1700	$3,9 \cdot 10^9$	0,23	
Антивибрит-2	1500	$3 \cdot 10^9$	0,44	
Антивибрит-5М	1600	$2,4 \cdot 10^9$	0,25	
Випонит	1200	$1,2 \cdot 10^8$	0,5	
Агат	1400	$10^9$	0,33	
Резина марок:				
– 615	530	$1,8 \cdot 10^6$	0,27	>1000
– 922	70	$3 \cdot 10^6$	0,35	
– 1002	750	$10^7$	0,6	

**Динамическое виброгашение.** Снижение вибраций достигается устройством массивных фундаментов (оснований) для машин с высокочастотным спектром вибраций. На индивидуальные виброгасящие фундаменты машины устанавливают согласно требованиям СНиП 2-02-05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Нормы проектирования». Методика расчета таких фундаментов опубликована.

Средства защиты от шума подразделяются на коллективные и индивидуальные (СИЗ). Из первых наиболее часто используют средства звукоизоляции, звукопоглощения и глушители шума.

Разработка или выбор средств защиты от шума проводится на основании акустического расчета, позволяющего определить в стадии проектирования ожидаемые уровни звукового давления (УЗД) в расчетных точках при известных источниках шума (ИШ) и их шумовых характеристиках, или измерений шума (в условиях эксплуатации). Требуемое снижение шума, дБ,  $\Delta L_{tp} = L - L_{доп}$ , где  $L$  – рассчитанные или измеренные УЗД;  $L_{доп}$  – допустимые УЗД. Методика акустического расчета известна из литературы.

**Средства звукоизоляции.** К средствам звукоизоляции (рис. 18.7) относятся звукоизолирующие ограждения 1, звукоизолирующие кабины и пульты управления 2, звукоизолирующие кожухи 3 и акустические экраны 4. Их применяют, когда нужно существенно снизить интенсивность прямого звука на рабочих местах.

Звукоизолирующие ограждения (стены, перекрытия, окна и т.д.) характеризуются звукоизоляцией  $R$  (дБ) воздушного шума. Требуемая звукоизоляция  $R_{tp}$  (дБ) ограждения смежных помещений определяется как  $R_{tp} = L_{ш} - L_{доп} + 10 \lg S_{огр} - 10 \lg B_{и}$ , где  $L_{ш}$  –

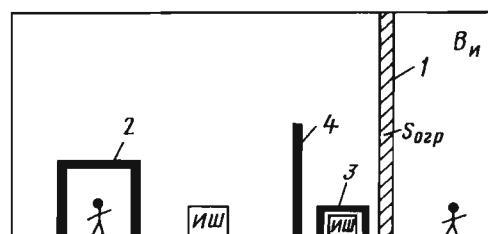


Рис. 18.7. Средства звукоизоляции

измеренный или рассчитанный УЗД в шумном помещении;  $L_{\text{доп}}$  – допустимый УЗД в изолируемом помещении, дБ;  $B_i$  – постоянная изолируемого помещения ( $\text{м}^2$ ), определяемая по справочным данным;  $S_{\text{огр}}$  – площадь ограждения,  $\text{м}^2$ .

Расчет и проектирование звукоизолирующих ограждений проводят с учетом  $R_{\text{тр}}$ . Возможны два пути решения этой задачи: 1) использование экспериментальных данных по звукоизоляции ограждений  $R_{\text{огр}} \geq R_{\text{тр}}$  на стандартных среднегеометрических частотах октавных полос; 2) расчетное в соответствии со СНиП II-12-77 определение  $R$ .

Для приближенных расчетов однослойного ограждения используют формулу

$$R = 20 \lg m f - 47,5,$$

где  $m$  – поверхностная плотность материала ограждения,  $\text{кг}/\text{м}^2$  ( $m = \rho h$ , где  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $h$  – толщина ограждения, м);  $f$  – частота звука, Гц.

*Звукоизолирующие кожухи* изготавливают из стали, дюраалюминия и других материалов. Внутренняя поверхность стенок кожуха должна быть облицована звукопоглощающим материалом (ЗПМ). Для сплошного герметич-

ного кожуха его требуемая звукоизоляция  $R_{\text{кож.тр}} = L - L_{\text{доп}}$  обеспечивается за счет звукоизоляции стенок кожуха (дБ):

$$R = R_{\text{кож.тр}} - 10 \lg \alpha_{\text{обл}},$$

где  $\alpha_{\text{обл}}$  – реверберационный коэффициент звукопоглощения используемого ЗПМ (табл. 18.13).

Расчет звукоизоляции кожухов можно найти в справочниках.

*Звукоизолирующие кабины* используют для размещения в них пультов дистанционного управления или рабочих мест в шумных помещениях. Требуемое снижение шума кабиной  $R_{\text{каб.тр}} = L_{\text{ш}} - L_{\text{доп}}$ , где  $L_{\text{ш}}$  – октавный УЗД на рабочем месте установки кабины, дБ;  $L_{\text{доп}}$  – допустимый УЗД на рабочих местах в кабинах, дБ.

Требуемую звукоизоляцию  $R_i$ -го элемента кабины (стеной, окном, дверью) определяют по формуле

$$R_{\text{тр } i} = L_{\text{ш}} - 10 \lg B_k + 10 \lg S_i - L_{\text{доп}} + 10 \lg n,$$

где  $B_k$  – постоянная кабины,  $\text{м}^2$ ;  $S_i$  – площадь  $i$ -го элемента кабины, через который шум проникает в кабину,  $\text{м}^2$ ;  $n$  – число одинаковых элементов, например окон.

### 18.13. Реверберационные коэффициенты звукопоглощения $\alpha_{\text{обл}}$

Звукопоглощающая конструкция	Толщина, мм	$\alpha_{\text{обл}}$ на среднегеометрических частотах октавных полос, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Акустические плиты «Акмигран», «Акминит»	20	0,02	0,11	0,3	0,85	0,9	0,78	0,72	0,59
Минераловатная плита, стеклоткань ЭЗ-100, гипсовая перфорированная плита с отверстиями 10 мм (коэффициент перфорации 13 %)	60	0,1	0,31	0,7	0,95	0,69	0,59	0,5	0,3
Супертонкое стекловолокно с тем же защитным покрытием	100	0,3	0,66	1,0	1,0	1,0	0,96	0,7	0,55
Супертонкое базальтовое волокно, стеклоткань ЭЗ-100, металлический перфорированный лист (коэффициент перфорации 27 %)	50	0,06	0,2	0,5	0,82	0,9	0,92	0,85	0,64
	100	0,22	0,51	0,73	0,8	0,88			0,84

**Акустические экраны** чаще всего изготавливают плоской и U-образной формы из металлических листов толщиной 1...2 мм с облицовкой слоем ЗПМ поверхности, обращенной к ИШ. Эффективность экранирования тем выше, чем больше соотношение ширины и высоты экранов и длиной звуковой волны  $\lambda = c / f$ , м ( $c$  – скорость звука в воздухе,  $c = 340$  м/с), поэтому их целесообразно применять для снижения средне- и высокочастотного шума. Методика расчета акустических экранов опубликована.

**Средства звукопоглощения.** Это звукопоглощающие облицовки и штучные звукопоглотители, устанавливаемые в помещении при его акустической обработке. Снижение УЗД в помещении для рабочих мест, находящихся в зоне отраженного звука, определяют по формуле  $\Delta L = 10 \lg [B_1 \psi(B\psi_1)]$ , дБ, где  $B$  и  $\psi$  – постоянная помещения и коэффициент до акустической обработки;  $B_1$  и  $\psi_1$  – то же, после обработки. Применяют звукопоглощающие облицовки в виде акустических плит («Акмигран», «Акминит» и др.) и слоев пористо-волокнистых материалов (стеклянного или базальтового супертонкого волокна, минеральной ваты и др.) в защитной оболочке из стеклоткани типа Э3-100 с перфорированным покрытием (металлическим, гипсовым и др.). Реверберационные коэффициенты звукопоглощения  $\alpha_{обл}$  для некоторых конструкций даны в табл. 18.13.

Для снижения шума рабочее место оператора установки термической резки необходимо ограждать звукоизолирующей кабиной-экраном, схема которой показана на рис. 18.8. Стенку кабины изготавливают из сплошного металлического листа 1 толщиной 1,5...2 мм со звукопоглощающей облицовкой 2 толщиной 50 мм, расположенной с внешней и внутренней сторон кабины и закрытой слоем стеклоткани типа Э3-100 и перфорированным металлическим листом 3 толщиной 1...1,5 мм (коэффициент перфорации  $\geq 20\%$ ). Возможна также установка акустических экранов плоской формы между машиной термической резки и рабочим местом. В этом случае экраны следует применять только в сочетании со звукопоглощающей облицовкой помещения.

Для снижения шума в помещении цеха сварочные трансформаторы, вращающиеся генераторы, многопостовые генераторы необходимо звукоизолировать либо вынести их за пределы рабочего места, участка или помещения.

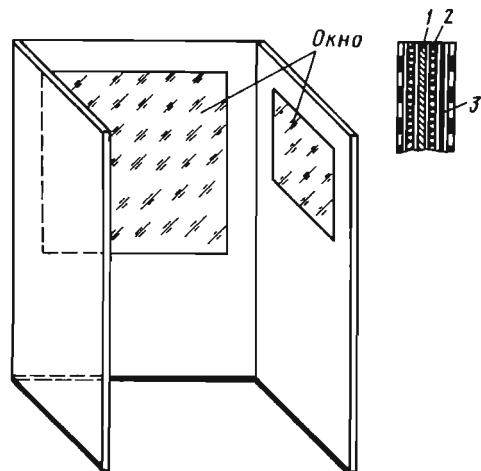
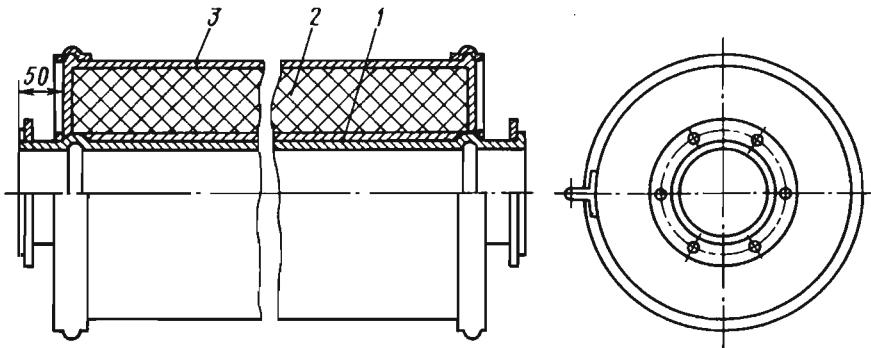


Рис. 18.8. Звукоизолирующая кабина

**Глушители шума.** Для снижения шума вентиляторных и компрессорных установок применяют глушители абсорбционного типа – трубчатые, пластиначатые, цилиндрические (рис. 18.9). Конструкции глушителей подбирают в зависимости от поперечных размеров воздуховодов, допустимой скорости воздушного потока, требуемого снижения УЗД. Для уменьшения шума систем сброса сжатого воздуха используют глушители с пористыми элементами.

Для защиты от ультразвука при распространении его по воздуху необходимо:

- повышать номинальные рабочие частоты источников ультразвука;
- оборудование, излучающее ультразвук, заключать в звукоизолирующие кожухи, выполненные из стального листа или дюралиумния толщиной 0,7...1 мм с обклейкой внутренней поверхности кожуха резиной, тонким (5...10 мм) слоем ЗПМ. Эффект установки таких кожухов 50...70 дБ. Возможно применение эластичных кожухов, изготовленных из двух-трех слоев резины общей толщиной 4...5 мм;
- между работающими и оборудованием, рабочими органами устанавливать экраны из прозрачных материалов;
- размещать ультразвуковое оборудование в специальных помещениях, кабинах, выгородках, если применение вышеперечисленных мер невозможно или не дает необходимой защиты.



**Рис. 18.9. Трубчатый глушитель шума:**  
1 – перфорированный лист; 2 – звукопоглощающий материал; 3 – корпус

При контактном действии ультразвука на руки защиты обеспечивают средства виброизоляции (пористая резина, резиновые перчатки и т.д.).

#### 18.2.3. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (ЭМП), ИЗЛУЧЕНИЙ

**Защита от ЭМП.** Защита работающих от воздействия МП частотой 50 Гц, создаваемых машинами контактной сварки, достигается:

- экранированием источника поля или рабочего места, снижающим напряженность МП до допустимого уровня;
- удалением рабочего места от источника на расстояние, где величина напряженности не превышает допустимых уровней («Защита расстоянием»);
- ограничением времени пребывания работающих в МП повышенной напряженности («Защита временем»);
- автоматизацией технологического процесса, дистанционным управлением оборудованием.

Необходимость применения защитных средств и мероприятий определяется на основании расчета напряженности  $H$  (А/м) МП на рабочих местах и сравнении ее с допустимыми уровнями (см. табл. 18.4).

В расчете принимается (по рекомендациям Харьковского НИИ гигиены труда и профзаболеваний, Украина), что источник МП представляет собой незамкнутый с одной стороны прямоугольник (стационарные машины точечной, рельефной и шовной сварки), отрезок конечной длины (стыковая сварка труб), круг (стыковая сварка изделий замкнутой фор-

мы), прямоугольник и двухпроводную линию (подвесные точечные машины).

Распределение напряженности МП по осям источника (рис. 18.10) описывается выражением

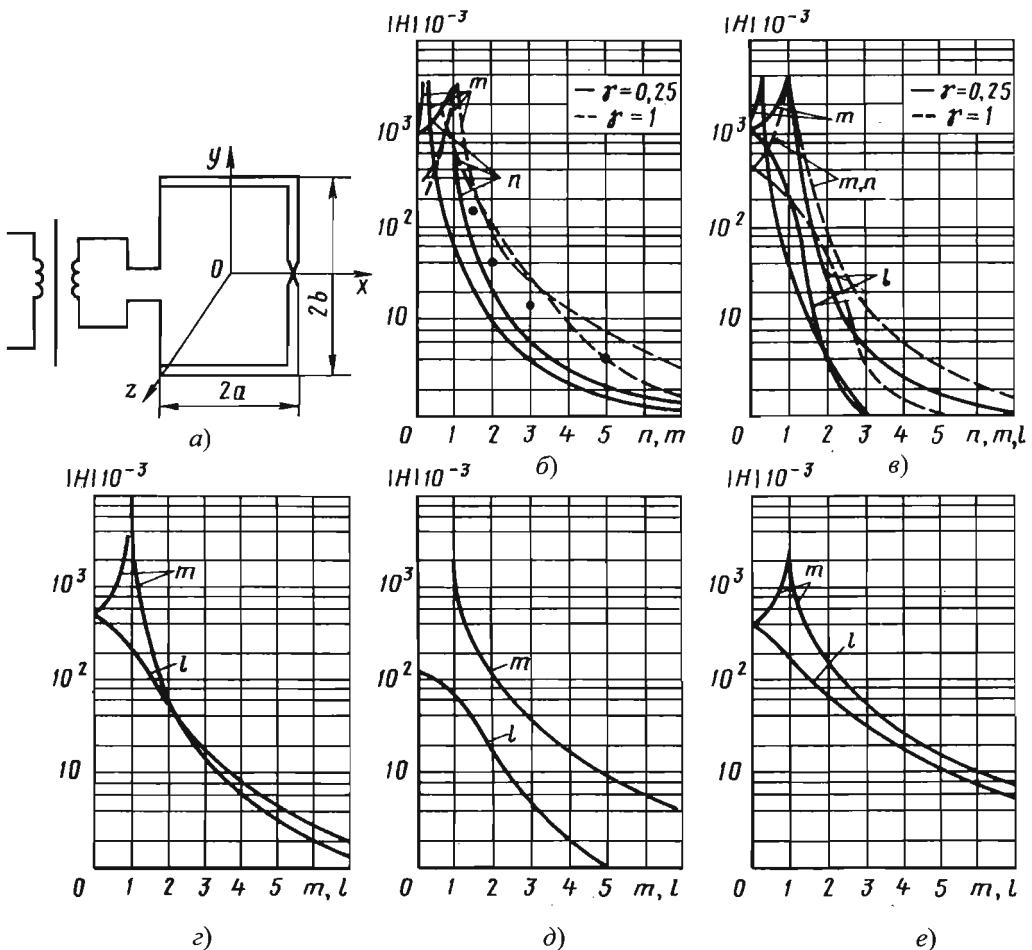
$$H = I k_{\phi} f(m) / a, \quad (18.1)$$

где  $I$  – максимальный ток сварки, А;  $k_{\phi} = 1,41$ ;  $a$  – наибольший размер источника, являющийся для круга – радиусом, прямоугольника – половиной большей стороны, двухпроводной линии – половиной расстояния между проводниками, отрезка конечной длины – его половиной;  $f(m)$  – величина, определяемая из графиков на рис. 18.10 и описывающая распределение МП для конкретного типа источников в зависимости от отношений  $m = x / a$ ;  $n = y / a$ ,  $l = z / a$ , где  $x, y, z$  – текущие координаты по оси.

Для точек, расположенных в плоскости витка на расстоянии 0,1 м от него, напряженность МП может быть приближенно определена как  $H = I / a$ .

**Пример расчета.** Рассчитать напряженность МП, создаваемого машиной точечной сварки МТП 75-15 на расстоянии 0,125; 0,25; 0,5 и 1 м от электродов, и определить необходимость защиты.

Максимальный ток короткого замыкания  $I = 14\ 100$  А (из описания машины). Принятая форма источника – незамкнутый с одной стороны прямоугольник со сторонами  $2a = 0,5$  м и  $2b = 0,22$  м при отношении  $\gamma = b / a = 0,5$ . Величины  $x$  для заданных точек соответственно равны 0,375; 0,5; 0,75; 1,25 м, а  $m = x / a$  составляют соответственно 1,5; 2; 3; 5. Из графика на рис. 18.10 находим  $f(m)$  для заданных точек при  $\gamma = 0,5$ ; 0,14; 0,04; 0,01; 0,004.



**Рис. 18.10. Схема источника МП (а) и графики распределения напряженности МП, создаваемого:**  
**б – тремя взаимно-перпендикулярными отрезками; в – витком прямоугольной формы;**  
**г – круговым витком; д – двухпроводной линией; е – отрезком конечной длины**

По формуле (18.1) определяем амплитудное значение напряженности  $H$  в точках, которое соответственно равно 11 133; 3180; 795; 318 А/м при условии тока синусоидальной формы ( $k_{\phi} = 1,41$ ).

Допустимое значение напряженности  $H = 1400$  А/м для восьмичасового рабочего дня. Определим расстояние от электродов до точки, где  $H = H_{\text{доп}}$ . Из формулы (18.1)  $f(m) = 1400 \cdot 0,25 / (14100 \cdot 1,41) = 0,0176$ ; из рис. 18.10, б  $m = 2,6$ . Следовательно, при  $x = 2,6 \cdot 0,25 = 0,65$  м от центра источника или 0,4 м от электродов напряженность МП не превышает допустимых уровней.

Эффективность экранирования (дБ)  $\mathcal{E} = 20 \lg (H / H_{\text{доп}})$  можно обеспечить, установив плоские или цилиндрические металлические (чаще всего стальные) экраны, толщина

которых  $d$ , м, может быть определена по формуле

$$d = (10^{3/20} - 1) 2r_{\mathcal{E}} / \mu_r,$$

где  $r_{\mathcal{E}}$  – характерный размер экрана, м, равный  $l/2$  для прямоугольного экрана шириной  $l$ , м, и  $r$  для цилиндрического радиуса  $r$ , м;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана (для стали  $\mu_r = 150$ ).

Эффективность экранирования

$$\mathcal{E} = 20 \lg [1 + \mu_r d / (2r_{\mathcal{E}})].$$

Методы защиты от высокочастотных ЭМП аналогичны вышеизложенным для МП.

Напряженность МП, создаваемого установкой сварки ТВЧ на рабочем месте на расстоянии  $x$ , м, от оси индуктора,

$$H = n_i I R_i^2 \beta_m / (4x^3),$$

где  $n_i$  и  $R_i$  – число витков и радиус катушки;  $I$  – сила тока, А;  $\beta_m$  – коэффициент, определяемый по графикам на рис. 18.11 в зависимости от отношений  $x/R_i$  и  $h/R_i$  ( $h$  – высота катушки, м).

При определении требуемой эффективности экранирования Э величины  $H_{\text{доп}} = 5$  ( $f = 60 \dots 1,5$  МГц) и  $0,3$  А/м ( $f = 30 \dots 50$  МГц).

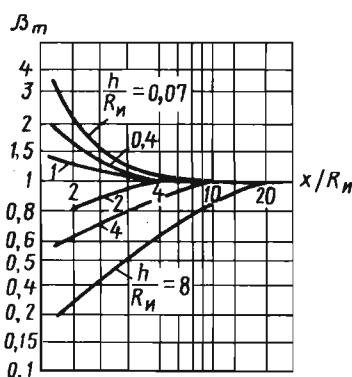


Рис. 18.11. График для определения коэффициента  $\beta_m$

Толщину  $d$ , м, обычно подбирают, руководствуясь конструктивными соображениями ( $d = 0,5 \dots 2,0$  мм), на основании выражения  $H / H_{\text{доп}} = R_3 e^{d/\delta} / (2,85\delta\mu_3)$ , где  $\delta$  – глубина проникновения поля в экран,  $\delta = (\pi f \mu'_3 \gamma_3)^{-1/2}$ .

Здесь  $\gamma_3$  – удельная проводимость стали, равная  $0,66 \cdot 10^7$  ( $\Omega \cdot \text{м}$ ) $^{-1}$ , а  $\mu'_3$  – абсолютная магнитная проницаемость,  $\mu'_3 = 1,88 \cdot 10^4$  Г/м.

Данные ориентировочной эффективности стальных экранов приведены в табл. 18.14.

#### 18.2.4. ЗАЩИТА ОТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В технологических процессах должны применяться лазерные установки закрытого типа (в технологически обоснованных случаях допускается использование установок открытого типа при соблюдении требований соответствующих правил). Лазеры III и IV кл. опасности должны применяться только в установках закрытого типа, в которых луч лазера на всем его протяжении и зона взаимодействия излучения с мишенью изолированы от работающих непрозрачными экранами, специальными системами транспортирования.

Средства защиты (табл. 18.15) выбирают в зависимости от класса опасности лазера, а также определяют размеры лазерно-опасной зоны (ЛОЗ).

#### 18.14. Эффективность стальных экранов

$f, \text{Гц}$	Эффективность Э, дБ, при толщине $d$ , мм							
	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
$10^3$	139	133	127	120	121	139	145	148
$10^4$	119	113	109	136	137	165	193	216
$10^5$	100	101	125	151	210	283	347	453
$10^6$	116	117	173	290	475	663	853	1233
$10^7$	131	190	327	677	1284	1929	2534	3712
$10^8$	270	455	833	1978	3917	4000		
$10^9$	657	1264	2514			4000		

### 18.15. Средства защиты от лазерного излучения

Средства защиты	Класс опасности лазера				Назначение и область применения
	I	II	III	IV	
Оградительные устройства (экраны, кожухи и т.д.)	-	- (+)	+	+	Для снижения уровня опасности и вредных производственных факторов до нормальных величин
Дистанционное управление	-	+	+	+	Всюду, где можно
Устройство световой или звуковой сигнализации	-	-	-	+	Для лазеров ИК-диапазона спектра
Маркировка знаком лазерной опасности	-	+	+	+	На лазерных установках, в зоне прохождения луча, на границе ЛОЗ
Кодовый замок	-	-	+	+	На дверях помещений; пульте управления
Защитные очки, снижающие уровень диффузного излучения	-	+	+	+	При времени воздействия >0,25 с
	-	-	+	+	Всегда, когда средства коллективной защиты не обеспечивают безопасность труда
Защитные запоры	-	+	+	+	При воздействии излучения в случае снятия оградительных устройств
Защитная одежда	-	-	-	+	При соответствующей опасности
Юстировочные очки	-	+	+	+	При юстировке, наладке и ремонтно-профилактических работах

**Примечание.** «+» – имеет место всегда; «-» – отсутствует; «- (+)» – зависит от характеристик лазера.

#### 18.2.5. ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Средства защиты разрабатывают с учетом категории облучаемых лиц и длительности облучения. Для лиц категории А мощность эквивалентной дозы на поверхности защиты не должна превышать 1,4 мбэр/ч (1,5 мР/ч) при 36-часовой рабочей неделе, а для категории Б – 0,12 мбэр/ч при 41-часовой рабочей неделе. Общие методы защиты аналогичны изложенным для ЭМП. Основной метод – экранирование.

Толщина защитных экранов зависит от вида и энергии излучения, свойств материала экрана и необходимой кратности ослабления

излучения  $k_o = (H / H_n) = (\dot{H} / \dot{H}_n)$ , где  $H$  и  $\dot{H}$  – эквивалентная доза, бэр (мбэр, мкбэр), и ее мощность, бэр/год (мбэр/ч, мкбэр/ч);  $H_n$  и  $\dot{H}_n$  – нормативные значения.

**Прямое  $\gamma$ -излучение.** Наиболее часто толщину экрана из свинца, железа, бетона  $d$ , в см, определяют по графикам и nomogrammам (рис. 18.12) или по таблицам, взятым из публикаций. Если известна толщина экрана  $d_1$  из материала плотностью  $\rho_1$ , то толщина экрана  $d_2$  с плотностью  $\rho_2$ , близкой к плотности  $\rho_1$ , может быть определена из соотношения  $d_2 = d_1 \rho_1 / \rho_2$ .

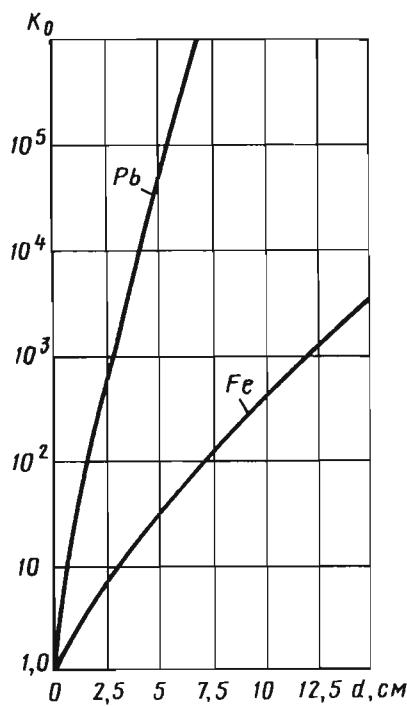


Рис. 18.12. Номограммы для расчета защитных экранов от  $\gamma$ -излучения

#### 18.16. Толщина защитного экрана, в мм, из свинца и бетона от прямого рентгеновского излучения

$k_2$	$U, \text{kV}$											
	100		125		150		200		250		300	
	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон
0,001	—				0,5			1		1,5		1,5
0,002	0,5	—	0,5	—	1	—	—	1,2	—	2,2	—	3
0,003												
0,005	0,8		0,8		1		1,3	2		2,5		4
0,01	1	70	1,3	100	1,5	140	2,3	180	3,5	200	6	260
0,02	1,3	85	1,5	140	1,8	150	2,5	200	4	230	7,2	290
0,03												
0,05	1,5	120	1,7	150	2	170	2,8	220	4,5	240	8,3	310
0,1												
0,2	1,8	140	2	160	2,3	200	3,5	270	5,8	300	11,5	370
					2,5	220	3,8	300	6,5	340	13	400

**Рассеянное  $\gamma$ -излучение.** Энергия рассеянного излучения 0,15...0,2 МэВ. При расчете защиты принимают излучение, рассеянное под углом  $90^\circ$  с интенсивностью на расстоянии 1 м от рассеивающей поверхности, равной 0,1 % прямого излучения. Толщина экрана из свинца, железа, бетона при десятикратном ослаблении составляет соответственно 0,2; 1,5; 8 см.

**Прямое рентгеновское излучение.** При напряжении на аноде рентгеновской трубы 75...300 кВ толщина защитного экрана из свинца, бетона определяется по данным табл. 18.16 в зависимости от коэффициента  $k_2 = k_3 I / R^2$  (категория А) и  $k_2 = I \cdot 10 / R^2$  (категория Б), где  $k_3$  – коэффициент запаса, равный 2;  $I$  – сила тока в трубке, мА;  $R$  – расстояние между трубкой и рабочим.

**Рассеянное рентгеновское излучение.** Толщина экрана из свинца и бетона определяется по табл. 18.17 ( $R$  – расстояние от места рассеяния излучения до рабочего места, м).

**Неиспользуемое рентгеновское излучение.** Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 5 см от корпуса камеры электронно-лучевой сварки не должна превышать 0,28 Р/ч. Толщина защитной стенки из свинца и стали при заданной кратности ослабления может быть определена по табл. 18.18 и 18.19.

Окончание табл. 18.16

$k_2$	$U, \text{kV}$											
	100		125		150		200		250		300	
	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон
0,3	2	160	2,3	180	2,8	230	4	310	7	350	13,5	410
0,5	2,2	170	2,5	200	3	250	4,5	320	7,5	370	14,5	430
1	2,5	180	2,8	220	3,2	270	5	350	8,5	400	16,5	460
2	2,8	200	3	240	3,5	290	5,5	380	9,5	430	18	490
3	2,9	210	3,3	260	4	310	5,8	390	10	440	19	500
5	3	220	3,5	300	4,3	340	6	400	10,5	460	20	520
10	3,3	240	3,8	320	4,5	360	6,5	430	11,5	490	21,5	560
20	3,4	250	4	340	4,8	400	7	460	12	520	23,5	600
30	3,5	260	4,2	350	5	410	7,5	470	13	540	24,5	610
50	3,8	270	4,5	360	5,3	420	7,8	480	13,5	570	25,5	620
100	4	300	4,8	380	5,5	430	8,2	500	14	580	27	650

**18.17. Толщина защитного экрана, в мм, из свинца и бетона  
от рассеянного рентгеновского излучения**

$k_2$	$U, \text{kV}$											
	100		150		200		250		300			
	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон
0,01	0,1	20	0,1	30	0,2	40	0,3	50	0,6	70		
0,02	0,2	35	0,3	45	0,5	65	0,8	75	1,2	95		
0,03	0,4	45	0,5	55	0,8	90	1,2	100	2,3	120		
0,05	0,5	55	0,8	80	1	120	1,5	125	3	145		
0,1	0,7	65	1	100	1,4	140	2	150	4	170		
0,2	0,9	80	1,2	120	1,8	170	2,7	180	5	200		
0,3	1	85	1,3	130	2	180	3	190	5,5	210		
0,5	1,2	100	1,5	140	2,2	190	3,5	210	6,3	220		
1	1,4	120	1,8	160	2,6	220	4,2	230	7,5	250		
2	1,6	130	2	185	3	250	5	260	9	280		
5	1,8	150	2,3	210	3,6	280	5,8	290	10,5	210		
10	2,1	170	2,6	230	4,1	300	6,5	320	12	340		
20	2,3	180	2,9	260	4,6	340	7,3	360	13,5	380		
50	2,5	200	3,2	280	5,1	370	8	390	15	410		
100	2,8	220	3,5	310	5,6	390	8,8	420	17	440		

**18.18. Толщина защиты из свинца для ослабления неиспользованного рентгеновского излучения, мм**

Кратность ослабления $K_o$	Напряжение на аноде, кВ							
	30	40	50	60	70	80	100	
2	—	—	—	—	—	0,2	0,2	
5				0,1	0,1	0,4	0,4	
10		0,1	0,2	0,2	0,5	0,6	0,6	
20				0,3	0,6	0,8	0,8	
50		0,2	0,2	0,4	0,5	1,0	1,1	
100				0,3	0,5	1,2	1,5	
$2 \cdot 10^2$		0,2	0,4	0,6	0,8	1,4	1,7	
$5 \cdot 10^2$				0,7	1,0	1,6	1,9	
$10^3$	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,7	2,1	
$2 \cdot 10^3$	0,2			0,9	1,3	1,8	2,4	
$5 \cdot 10^3$	0,6		1,1	1,5	2,1	2,7		
$10^4$			0,7	1,2	1,6	2,3		
$2 \cdot 10^4$	0,4	0,4	1,2	1,6	2,3	2,9	2,9	
$5 \cdot 10^4$			1,3	1,8	2,5	3,2	3,2	
$10^5$		0,5	0,8	1,4	2,0	2,7	3,5	
$2 \cdot 10^5$			0,9	1,5	2,1	2,8	3,7	
$5 \cdot 10^5$				1,6	2,3	3,0	4,0	
$10^6$	0,3	0,6	1,0	1,7	2,5	3,2	4,3	
$2 \cdot 10^6$				1,8	2,6	3,4	4,6	
$5 \cdot 10^6$		0,7	1,1	2,0	2,8	3,6	4,9	
$10^7$			1,2	2,1	3,0	3,8	5,2	
$2 \cdot 10^7$	0,4	0,7	1,3	2,3	3,4	4,2	5,7	
$5 \cdot 10^7$			0,8	1,4	2,4	3,5	4,4	
$10^8$							6,0	

**18.19. Толщина защиты из стали для ослабления неиспользованного рентгеновского излучения, мм**

Кратность ослабления $K_o$	Напряжение на аноде электронного прибора, кВ (максимальное)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
2					—	—	0,1	0,1	0,2
5		—	—	—	0,1	0,2	0,3	0,4	
10				0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	
20		—	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
50				0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,3
100			0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,6	
$2 \cdot 10^2$				0,3	0,4	0,6	1,0	1,3	2,0
$5 \cdot 10^2$		0,1		0,3	0,5	0,8	1,2	1,6	2,4
$10^3$			0,4	0,6	0,9	1,4	1,9	2,7	
$2 \cdot 10^3$			0,4	0,7	1,1	1,6	2,2	3,1	
$5 \cdot 10^3$			0,5	0,8	1,2	1,9	2,6	3,6	
$10^4$		0,1	0,4	0,9	1,4	2,1	2,8	3,9	
$2 \cdot 10^4$			0,4	0,6	1,0	1,5	2,3	3,1	4,3
$5 \cdot 10^4$			0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,5	4,9
$10^5$			0,5	1,2	1,8	2,7	3,8	5,3	
$2 \cdot 10^5$			0,8	1,3	1,9	2,9	4,1	5,7	
$5 \cdot 10^5$			0,8	2,1	3,2	4,4	6,2		
$10^6$			0,9	1,4	2,2	3,4	4,7	6,6	
$2 \cdot 10^6$			0,6	1,5	2,3	3,6	5,0	7,0	
$5 \cdot 10^6$			0,6	1,6	2,5	3,8	5,4	7,5	
$10^7$			0,7	1,7	2,6	4,0	5,7	7,9	
$2 \cdot 10^7$			0,7	1,8	2,8	4,2	6,0	8,3	
$5 \cdot 10^7$			0,7	1,9	2,9	4,5	6,4	8,7	
$10^8$	0,1		0,8	2,0	3,1	4,7	6,6	9,2	

Эквивалентную свинцу толщину защитной стенки, мм, из стали надо определять по следующим данным (напряжение 60 и 100 кВ):

Свинец .....	1	2	3	4	6	8
Сталь .....	5...6	10...12	16...19	22...25	36	56

### 18.2.6. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

**Защитное заземление.** Область применения защитных заземлений определяется Правилами устройства электроустановок.

В системах защитного заземления наибольшие допустимые значения сопротивления  $R_{\text{доп}}$ , Ом, заземляющего устройства (ЗУ):

- для электроустановок напряжением до 1 кВ составляют 10 Ом при мощности генераторов и трансформаторов  $\leq 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  (в том числе при параллельной работе) и 4 Ом во всех остальных случаях;

- для электроустановок напряжением  $> 1 \text{ кВ}$  равны  $250/I_3$  ( $I_3$  – ток замыкания на землю, А), но  $\leq 10$  Ом при изолированной нейтрали;  $125/I_3$  – то же, но в случаях использования ЗУ одновременно для электроустановок напряжением до 1 кВ; 0,5 Ом в сети с эффективно заземленной нейтралью.

Расчет защитного заземления состоит в определении основных параметров ЗУ – числа, размеров размещения вертикальных электродов, длины горизонтальных соединительных шин, при которых общее сопротивление растеканию тока  $R_3 \leq R_{\text{доп}}$ .

Для заземления стационарных сварочных установок применяют групповые искусственные заземлители (рис. 18.13, а).

Рассмотрим порядок расчета.

1. Выбирают тип и размеры вертикальных электродов (стальные прутки диаметром 10...15 мм, трубы диаметром 30...50 мм, уголки от  $40 \times 40$  до  $60 \times 60$  мм) и определяют сопротивление одиночного вертикального электрода (рис. 18.13, б).

$$R_b = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left( \ln \frac{2,1l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right),$$

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L^2}{bt_0}.$$

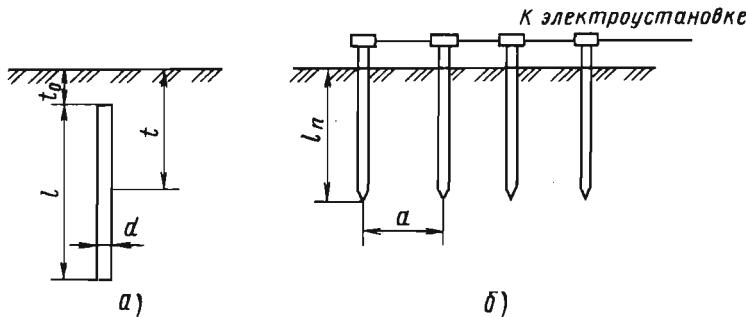


Рис. 18.13. Заземлители стационарных (а) и передвижных установок (б)

где  $\rho_1$  – удельное сопротивление грунта, Ом · м, определяемое как  $\rho_1 = \rho_i \psi$  [здесь  $\rho_i$  – измеренное или принятое ориентировочное значение удельного сопротивления грунта (чернозем – 10...15 Ом; торф – 10...30; полутордые глины – 40...80; почва – 10...300; песок (при глубине залегания вод < 5 м) – 300...700; он же (при глубине залегания 6...10 м) – 500...1500 и т.д.);  $\psi$  – коэффициент сезонности, определяемый по табл. 18.20 в зависимости от климатической зоны, где делается заземление, и конструкции заземлителя].

Длина  $l$ , м, обычно принимается равной 2...4 м для труб; 2,5...3 м для уголков; 4...5 м для прутков; глубина  $t_0 = 0,7$  м;  $t = 0,5l + t_0$ ; для уголка с шириной полки  $b$  величина  $d = 0,95b$ .

2. Определяют число  $n$  вертикальных электродов, используя данные табл. 18.21. Предварительно находят произведение  $n\tau_b = R_b / R_{\text{доп}}$  ( $\tau_b$  – коэффициент использования вертикальных электродов) при выбранном отношении  $a/l$  (обычно  $a/l = 2...3$  для заземлителей, расположенных в ряд,  $a/l = 3$  расположенных по контуру, где  $a$  – расстояние между электродами). Неуказанные значения  $n$  находят методом интерполяции, округляя в меньшую сторону.

3. С учетом схемы размещения заземлителя в грунте находят длину  $L$ , м, горизонтального проводника связи в виде стальной полосы шириной  $b$ , м, по формулам: при расположении электродов в ряд  $L = 1,05(n-1)a$ ; по контуру –  $L = 1,05na$ . Вычисляют сопротивление этого проводника по формуле

**18.20. Коэффициенты сезонности  $\psi$  для однородной земли  
при нормальной влажности**

Характеристика климатической зоны и тип электрода	Климатические зоны			
	I	II	III	IV
<i>Признаки климатических зон</i>				
Средняя многолетняя низшая температура (январь), °C	-20...-15	-14...-10	-10...0	0...5
То же, высшая (июль), °C	16...18	18...22	22...24	24...26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30...50
Продолжительность замерзания вод, дни	190...170	150	110	0
<i>Коэффициенты сезонности</i>				
Вертикальный электрод длиной 3 м	1,7	1,5	1,3	1,1
То же, длиной 5 м	1,4	1,3	1,2	1,1
Горизонтальный электрод длиной 10 м	5,5	3,5	2,5	1,5
То же, длиной 50 м	4,5	3,0	2,0	1,4

**18.21. Коэффициенты использования  $\eta_v$  вертикальных электродов**

$a/l$	При размещении в ряд			При размещении по контуру		
	$n\eta_v$	$n$	$\eta_v$	$n\eta_v$	$n$	$\eta_v$
1	1,70	2	0,85	2,76	4	0,69
	2,34	3	0,78	3,66	6	0,61
	2,92	4	0,73	5,50	10	0,55
	3,50	5	0,7	9,40	20	0,47
	3,90	6	0,65	16,40	40	0,41
	5,90	10	0,59	23,40	60	0,39
	8,10	15	0,54	36,00	100	0,36
	9,60	20	0,48		—	
2	1,82	2	0,91	3,12	4	0,78
	2,61	3	0,87	4,38	6	0,73
	3,32	4	0,83	6,80	10	0,68
	4,05	5	0,81	12,60	20	0,63
	4,62	6	0,77	23,20	40	0,58
	7,40	10	0,74	33,0	60	0,55
	10,50	15	0,70	52,0	100	0,52
	13,40	20	0,67		—	

Окончание табл. 18.21

a/l	При размещении в ряд			При размещении по контуру		
	n $\eta_v$	n	$\eta_v$	n $\eta_v$	n	$\eta_v$
3	1,88	2	0,94	3,4	4	0,85
	2,73	3	0,91	4,8	6	0,80
	3,56	4	0,89	7,6	10	0,76
	4,35	5	0,87	14,2	20	0,71
	5,10	6	0,85	26,4	40	0,66
	8,10	10	0,81	38,4	60	0,64
	11,70	15	0,78	62,0	100	0,62
	15,20	20	0,76	—	—	—

Площадь сечения горизонтального проводника должна быть  $\geq 48 \text{ мм}^2$  толщиной  $\geq 4 \text{ мм}$ . Возможно использование стального круглого проводника диаметром  $d$  ( $\geq 6 \text{ м}$ ). Тогда  $b = 2d$ .

4. Определяют результирующее сопротивление заземлителя растеканию тока  $R_3 = R_b R_r / (R_b \eta_r + R_r \eta_b n)$ , где  $\eta_r$  – коэффициент использования горизонтального проводника (табл. 18.22).

Если результаты расчета не удовлетворяют требованиям, т.е.  $R_3 > R_{\text{доп}}$ , то изменяют

параметры заземлителя и методом последовательного приближения добиваются выполнения требований к сопротивлению заземлителя.

Для заземления передвижных сварочных установок используют инвентарные заземлители (см. рис. 18.13, б) с зажимом трех типоразмеров; длиной 1180, 1500, 2000 мм, диаметром  $d = 15 \text{ мм}$ , при этом глубина погружения в грунт  $l_p$  составляет соответственно 580, 900 и 1400. Целями расчета являются определение числа  $n$  инвентарных заземлителей и их размещение на участке заземления.

### 18.22. Коэффициенты использования $\eta_r$ горизонтального проводника

a/l	Число вертикальных электродов											
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60	70	100
<i>При расположении электродов в ряд</i>												
1	0,85	0,77	0,72	0,67	0,62	0,42	0,31		0,21			
2	0,94	0,89	0,84	0,79	0,75	0,56	0,46	—	0,36			
3	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,68	0,58		0,49			
<i>При расположении электродов по контуру</i>												
1		0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
2	—	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,23
3		0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,39	0,37	0,36	0,35	0,33

1. Определяют сопротивление одиночного заземлителя при выбранных размерах  $l_{\text{п}}$  и  $d$ :

$$R_3 = \rho \ln(4l_{\text{п}}/d)/(2\pi l_{\text{п}}).$$

2. В зависимости от размеров и формы участка, отведенного под заземлитель, размещают электроды в ряд или по контуру. Расстояние  $a = l_{\text{п}}$ , реже  $a = 2l_{\text{п}}$ .

3. Находят произведение  $n\eta_{\text{в}} = R_3/R_{\text{доп}}$  и по табл. 18.21 определяют число инвентарных заземлителей  $n$ .

4. Результирующее сопротивление заземлителя

$$R_3 = R_3/(n\eta_{\text{в}}).$$

Так же, как и в случае стационарных установок, методом последовательного приближения удовлетворяют условие  $R_3 \leq R_{\text{доп}}$ .

**Зануление.** Расчет зануления включает в себя определение отключающей способности и величин заземления нейтрали и повторных заземлителей.

Согласно Правилам устройства электроустановок проводимость фазных и нулевых защитных проводников выбирают такой, чтобы при замыкании фазы на корпус или на нулевой защитный проводник возникал ток короткого замыкания  $I_{\text{k,з}}$ , превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток  $I_{\text{ном}}$  плавкого элемента ближайшего предохранителя или нерегулируемого расцепителя либо уставку тока регулируемого расцепителя автоматического выключателя. Значения  $I_{\text{ном}}$  стандартных плавких предохранителей (в амперах) для сетей напряжением 220 и 380 В приведены ниже.

НПИ-15 .....	6, 10, 15
НПН-60М .....	20, 25, 35, 45, 60
ПН2-100 .....	30, 40, 60, 80, 100
ПН2-250 .....	80, 100, 120, 150, 200, 250
ПН2-400 .....	200, 250, 300, 350, 400
ПН2-600 .....	300, 400, 500, 600
ПН2-1000 .....	500, 600, 750, 800, 1000

При использовании автоматических выключателей, имеющих только электромагнитный расцепитель, проводимость проводников должна обеспечивать ток не ниже уставки тока мгновенного срабатывания, умноженный на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным), и на коэффициент запаса 1,1.

При отсутствии таких данных  $I_{\text{k,з}} \geq kI_{\text{ном}}$ , где  $k = 1,4$  для  $I_{\text{ном}} < 100 \text{ A}$ ;  $k = 1,25$  для  $I_{\text{ном}} > 100 \text{ A}$ .

Сопротивление заземления нейтрали и повторных заземлителей не должны превышать следующих значений: напряжение сети 660/380; 380/220 и 220/127 В соответственно 15; 30 и 60 Ом. Расчет этих сопротивлений проводится аналогично изложенному для защитного заземления.

### 18.3. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

**Задача атмосферы.** Очистку выбросов допускается не предусматривать для источников малой мощности при условии выполнения нижеприведимых требований и если это не нужно по разделу проекта «Охрана атмосферного воздуха от загрязнений». К вентиляционным источникам малой мощности относится один или условный источник, заменяющий группу источников (выбросных труб, устройств и т.п.), находящихся на кровле здания в пределах площади круга диаметром 20 м, с общим расходом пылегазовоздушной смеси  $L \leq 10 \text{ м}^3/\text{с}$ , концентрацией для одного или условного источника  $q (\text{мг}/\text{м}^3)$  по каждому ВВ, не превышающей по пыли 100  $\text{мг}/\text{м}^3$ , и величин  $q_1 - q_3$ , определяемых по формулам СНиП 2.0.4-05-91:

$$q_1 = 10(H + D) q_n / D;$$

$$q_2 = L_{\text{кон}} q_n / L,$$

$$q_3 = 0,08 lk_{w,z} / D,$$

где  $H$  – высота, м, расположения устья источника диаметром  $D$ , м, над уровнем земли; для группы из  $n$  источников  $H$  – высота условного

источника, равная  $H = \left( \sum_{i=1}^n H_i \right) / n$  диамет-

ром  $D = (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)^{0,5}$ ;  $L_{\text{кон}}$  – условный расход атмосферного воздуха для разбавления ВВ, принимаемый при расстояниях от источника до границы населенного пункта 50, 100, 300, 500 м соответственно равным 60, 250, 2000, 6000  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $L$  – расход пылегазовоздушной смеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ , для одного источника или общий расход для их группы;  $l$  – расстояние (м) между устьем одного источника и приемным вентиляционным устройством для на-

ружного воздуха по горизонтали, принимаемое при  $l < 10D$  равным  $10D$ , а при  $l > 60D$  – равным  $60D$ ; для группы из  $n$  источников рас-

$$\text{стояние условного источника } l = \left( \sum_{i=1}^n l_i \right) / n;$$

$k$  – коэффициент, характеризующий уменьшение концентрации ВВ, определяемый по рис. 18.14;  $q_n$  и  $q_{w,z}$  – предельно допустимые концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$ , принимаемые равными  $q_n = \text{ПДК}_n$  и  $q_{w,z} = \text{ПДК}_{P3}$ .

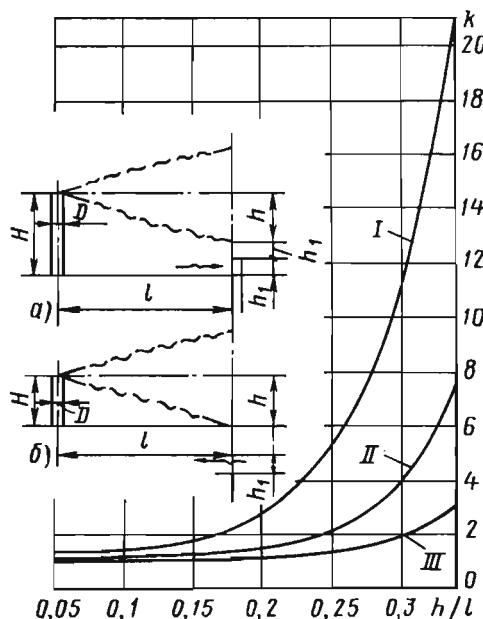


Рис. 18.14. График для определения коэффициента  $k$ :

- а – над зоной всасывания приемного устройства для наружного воздуха при высоте трубы  $H = h + 2h_1$ ;
- б – над кровлей здания при высоте трубы  $H = h$ ;  $h$  – расстояние по вертикали горизонтальной оси струи, м;  $h_1$  – высота отверстия для приема наружного воздуха, м;  $l$  – расстояние между устьем источника и приемным устройством для наружного воздуха, м; I – график для определения  $k$  источника, если приемное устройство находится вне зоны аэродинамической тени; II – график для определения  $k$  источника, находящегося в зоне аэродинамической тени, при приемном устройстве вне этой тени; III – график для определения  $k$  источника и приемного устройства, находящихся в зоне аэродинамической тени

Если в результате расчета окажется, что величина  $q$  превышает хотя бы одну из величин  $q_1$  –  $q_3$ , то выбрасываемая смесь должна очищаться.

Пример расчета. Для проектируемой установки местной вытяжной вентиляции сварочного цеха с расходом воздуха  $L = 14\ 400 \text{ м}^3/\text{ч} = 4 \text{ м}^3/\text{s}$  требуется определить необходимость в его очистке. Исходные данные: сварка проводится электродами УОНИ-13/65 с общим расходом  $G_{c,m} = 20 \text{ кг}/\text{ч}$ ; выброс осуществляется через воздуховод высотой  $H = 20 \text{ м}$  и диаметром  $D = 0,5 \text{ м}$  на расстоянии  $l = 60D = 30 \text{ м}$  от приемного устройства и на расстоянии 100 м от границы жилого района ( $L_{con} = 250 \text{ м}^3/\text{s}$ ); основным ВВ является марганец с массовой долей  $< 20\%$  сварочного аэрозоля ( $q_n = 0,01 \text{ мг}/\text{м}^3$  и  $q_{w,z} = 0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$  по табл. 18.2).

Сначала определяем концентрацию марганца в выбрасываемом воздухе как  $q = Z / L$ , где  $Z$  – количество марганца,  $\text{мг}/\text{ч}$ , удаляемого МО и, соответственно, выбрасываемого в атмосферу и определяемого как  $Z = \eta_{MO} Z_{ud} G_{c,m} \cdot 10^3$ , где  $\eta_{MO}$  – КПД МО  $\eta_{MO} = 0,8$ ;  $Z = 0,8 \cdot 1,41 \cdot 20 \cdot 10^3 = 22\ 560 \text{ мг}/\text{ч}$  и  $q = 1,57 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Величина  $q_1 = 10 (20 + 0,5) / 4,01 / 0,5 = 4,1 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;  $q_2 = 250 \cdot 0,01 / 4 = 0,625 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;  $q_3 = 0,08 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 0,2 / 0,5 = 2,88 \text{ мг}/\text{м}^3$  (коэффициент  $k = 3$  по рис. 18.14 для  $h / l = 0,2$ , кривая I). Поскольку  $q > q_2$ , данный выброс нельзя отнести к источникам малой мощности и его необходимо оборудовать очистным устройством.

Выбросы в атмосферу из систем вентиляции необходимо размещать на расстоянии от приемных вентиляционных устройств  $\geq 10 \text{ м}$  по горизонтали или 6 м по вертикали при горизонтальном расстоянии  $< 10 \text{ м}$ , а также на высоте  $\geq 2 \text{ м}$  над высшей точкой кровли.

Для очистки воздуха от сварочного аэрозоля используют как индивидуальные (на один сварочный пост), так и групповые установки (на несколько постов). Эти установки чаще всего работают на полной рециркуляции воздуха, что существенно (до 90 %) сокращает расход энергии на нагрев воздуха. Удалением небольших объемов воздуха с высокими концентрациями сварочного аэрозоля достигаются санитарно-гигиенический эффект и необходимая чистота воздуха в РЗ. Эффективность очистки  $\mathcal{E}$  может достигать 97...99 % ( $\mathcal{E} = q_1 - q_2 / q_1 \cdot 100 \%$ , где  $q_1$  и  $q_2$  – концентрации сварочного аэрозоля до и после очистки,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ).

Очистка осуществляется в бумажных и тканевых фильтрах, электрофильтрах, адсорберах.

Бумажные и тканевые фильтры обеспечивают высокую эффективность (до 99,9 %), но имеют сравнительно малые сроки службы фильтровального материала, что вынуждает часто его менять.

Электрофильтры находят широкое применение в очистных установках. Наибольшее распространение получили двухзонные электрофильтры, в которых процессы зарядки и осаждения частиц конструктивно разделены. Электрофильтры выгодно отличаются от тканевых и бумажных фильтров небольшим гидравлическим сопротивлением (5...10 Па, у пористых фильтров 300...1200 Па при одинаковых нагрузках) и малыми эксплуатационными затратами.

Ряд фирм США, Финляндии, Швеции и других стран выпускают фильтровентиляционные агрегаты, в которых осуществляется двух- или трехступенчатая очистка воздуха. Так, фирма «Plymovent» (Швеция) изготавливает различные модификации агрегатов. Портативные агрегаты ТК-200, -400 с производительностью 150 и 300 м<sup>3</sup>/ч имеют искрогаситель и бумажный фильтр с Э > 99 %. Для очистки воздуха от газов агрегаты могут быть снабжены дополнительными фильтровальными насадками из активированного угля. В агрегатах мод. R-3, -4, -5 производительностью 450, 600 и 750 м<sup>3</sup>/ч осуществляется двухступенчатая очистка воздуха: в циклоне, где происходит отделение крупных частиц, и в основном фильтре с площадью активной фильтрующей поверхности 20 м<sup>2</sup>. Предусмотрено место и для третьей ступени очистки. Замена основного фильтра требуется после использования нескольких тысяч электродов. В передвижных агрегатах МК-800 и МК-1200 (производительность 800 и 1200 м<sup>3</sup>/ч) очистка также двухступенчатая: первая ступень – фильтр предварительной очистки толщиной 40 мм из синтетического волокна с увеличивающейся по ходу движения воздуха плотностью, вторая – фильтр тонкой очистки из волокна целлюлозы. Передвижные агрегаты ЕМК-1400 и -1600 (производительность 1400 и 1600 м<sup>3</sup>/ч) имеют вторую ступень очистки в виде двухзонного электрофильтра, который необходимо периодически промывать водой.

Для очистки воздуха от токсичных газов и паров применяют сорбционные аппараты, в

которых используют различные сорбенты, чаще всего активированный уголь, в сочетании с бумажными или тканевыми фильтрами, а также электрофильтрами.

**Защита водоемов.** При строительстве новых и реконструкции действующих предприятий следует предусматривать внедрение оборотных систем водоснабжения. Для этого требуется соответствующее технологическое оборудование для высокоэффективной очистки сточных вод с последующим использованием их в технологическом процессе.

Сточные воды большинства машиностроительных предприятий можно разделить на следующие основные категории:

I – чистые, образующиеся при охлаждении технологического оборудования (50...80 %);

II – загрязненные механическими примесями и маслами (10...15 %);

III – загрязненные кислотами, щелочами, солями, соединениями хрома и другими химическими веществами (5...10 %);

IV – отработавшие смазочно-охлаждающие жидкости или эмульсии (до 1 %);

V – загрязненные пылью вентиляционных систем (10...15 %);

VI – поверхностные (дождевые, талые, поливочно-моющие);

VII – бытовые.

В сварочных цехах вода используется для охлаждения сварочного инструмента. Сточные воды являются чистыми (категория I). Схема оборотного водоснабжения с использованием универсальных аппаратов с кипящим слоем (АУКС) или градирен типа ГПВ показана на рис. 18.15. При работе с АУКС открыты вентили 1 – 4, закрыты 5 – 9; при работе на свежей воде открыты вентили 3 – 6, закрыты 1, 2, 7 – 9. Аппараты АУКС выбираются исходя их требуемой производительности по воде, м<sup>3</sup>/ч (АУКС-4, -8, -15, -25, -50, где 4, 8 и т.д. – производительность аппарата, м<sup>3</sup>/ч) и перепада температур охлаждаемой воды.

При гидравлических испытаниях емкостей и трубопроводов необходимо предусматривать повторное (многократное) использование воды, забираемой из водоемов или систем водоснабжения.

Вопросы очистки сточных вод категорий II – VII можно найти в публикациях.

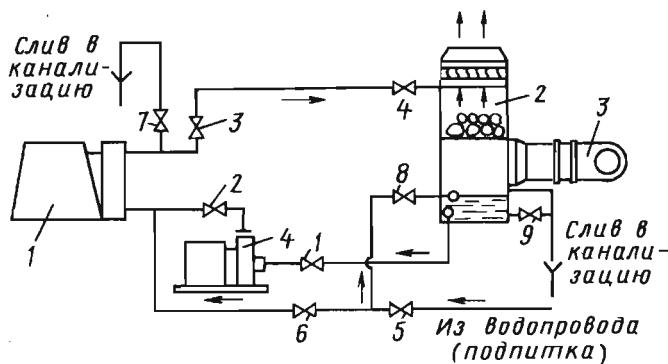


Рис. 18.15. Схема оборотной системы водоснабжения

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безопасность производственных процессов: Справочник / С.В. Белов, В.Н. Бринза, Б.С. Векшин и др.; Под общ. ред. С.В. Белова. М.: Машиностроение, 1985. 448 с.**
2. **Глебов А.З.** Рациональная организация рабочего места электросварщика. М.: Машиностроение, 1982. 80 с.
3. **Нормы радиационной безопасности НРБ-99.**
4. **ОНД-86.** Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоиздат, 1987.
5. **Писаренко В.Л., Рогинский М.Л.** Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.
6. **Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.** М.: НПО ПТБ, 2000.
7. **Правила устройства электроустановок.** М.: ЗАО «Энергосервис», 2002. 608 с.
8. **Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых общественных зданий и на территории жилой застройки.** М.: Минздрав России, 1997.
9. **Санитарные нормы СН 2.2.4.723-98. Переменные магнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях.** М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 72 с.
10. **Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами.** Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 183 с.
11. **Смирнов Д.Н., Генкин В.Е.** Очистка сточных вод в процессе обработки металлов. М.: Металлургия, 1980. 196 с.
12. **Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование: Справочник / С.В. Белов, А.Ф. Козыяков, О.Ф. Партолин и др.; Под ред. С.В. Белова. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.**
13. **Средства индивидуальной защиты работающих на производстве: Каталог-справочник / Под ред. В.Н. Ардасенова. М.: Профиздат, 1988. 176 с.**
14. **Строительные нормы и правила СНиП II-4-77. Защита от шума. Нормы проектирования.** М.: Стройиздат, 1978. 49 с.
15. **Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования.**
16. **Строительные нормы и правила СНиП 2.0.4-05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования.** М.: Стройиздат, 1987. 62 с.
17. **Межотраслевые правила по охране труда при электро- и газосварочных работах ПОТ Р М-020-2001.** М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 72 с.

## Г л а в а 19

# СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

---

---

Надежность и долговечность сварных конструкций, их экономичность в изготовлении и эксплуатации являются основными показателями качества технологического процесса (ТП) изготовления конструкций в сборочно-сварочном производстве. При проектировании технологии изготовления сварного изделия разрабатывают комплекс операций, включая заготовительные, сборочные, сварочные и контрольные. Рационально разработанный проект технологии должен обеспечивать получение надежных сварных соединений и конструкций, отвечающих всем эксплуатационным требованиям, а также позволять в максимальной степени осуществлять комплексную механизацию и автоматизацию производственного процесса изготовления изделия при минимальной трудоемкости операций, наименьшем расходе сварочных материалов и электроэнергии и полном соблюдении правил и норм техники безопасности при проведении работ.

Наиболее прогрессивный способ проектирования – одновременная разработка конструкций и технологии их производства. В этом случае основным документом для изготовления изделия служит Единая конструкторско-технологическая документация (ЕСТД), выполняемая в соответствии с нормативными документами. При этом разрабатываемые или применяемые ТП должны соответствовать принципам сертификации и стандартизации, определяемым государственными (ГОСТ) и отраслевыми (ОСТ) стандартами

### 19.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТП СВАРКИ

#### 19.1.1. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП СВАРКИ

Проектирование ТП сварки представляет собой сложную оптимизационную задачу, основанную на использовании расчетных аналитических методов проектирования. Оптимальный вариант ТП изготовления сложной сварной конструкции выбирается из нескольких расчетных вариантов технологии. В зависимости от основного назначения различают перспективные и рабочие ТП.

Перспективный ТП включает в себя:

- последовательность технологических операций;
- разбивку конструкции на отдельные технологические узлы или элементы;
- эскизную проработку специальных приспособлений и оснастки;
- расчеты режимов основных сварочных процессов, расчеты ожидаемых сварочных напряжений и деформаций;
- сравнительную оценку разработанных вариантов технологии.

После окончательного утверждения технического проекта и принятого варианта технологии выполняют рабочее проектирование конструкции (составление конструкторской документации) и разработку рабочей технологии (составление технологической документации).

Рабочий ТП включает в себя:

- уточнения и изменения принципиального ТП, связанные с изменением конструкции на этапе рабочего проектирования;
- разработку технологических карт, в которых указывают все параметры режима сварки, применяемые сварочные материалы и оборудование;
- краткие описания технологических приемов выполнения отдельных сварочных операций;
- требования к прочности и качеству сварных конструкций на отдельных этапах их изготовления;
- указания методов проверки точности и контроля качества соединений, узлов и готовой конструкции.

В зависимости от количества изделий, охватываемых процессом, установлено два вида ТП: типовой и единичный. Правила разработки рабочих ТП предусматривают обязательное использование типовых ТП и стандартов на технологические операции.

В зависимости от степени детализации каждый ТП может быть маршрутным, опера-

циональным или операционно-маршрутным. Типовые ТП разрабатывают на основе анализа многих действующих и возможных ТП для типовых представителей групп изделий.

Технологическая операция является частью ТП, выполняемой на одном рабочем месте.

#### 19.1.2. РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО ТП СВАРКИ

К основным этапам разработки типового ТП относятся:

1) классификация объектов производства – выбирают группы объектов, имеющих общие конструктивно-технологические характеристики, и типовых представителей групп;

2) количественная оценка групп объектов – оценка типа производства (единичное, серийное или массовое);

3) анализ конструкций типовых объектов по чертежам, техническим условиям (ТУ), программам выпуска и типу производства – разрабатывают основные маршруты изготовления конструкций, включая заготовительные процессы;

4) выбор заготовки и способов ее изготовления с технико-экономической оценкой – оценивают точностные характеристики способов изготовления и качества поверхности, выбирают метод обработки;

5) выбор технологических баз;

6) выбор вида производства (сварка, литье, обработка давлением, механическая обработка);

7) составление технологического маршрута обработки – определяют последовательность операций и выбирают группы оборудования по операциям;

8) разработка технологических операций, включающая в себя:

- рациональное построение операций;

- выбор структуры операций;

- рациональную последовательность переходов в операции;

- выбор оборудования, обеспечивающего оптимальную производительность и требуемое качество;

- расчет загрузки технологического оборудования;

- выбор конструкции технологической оснастки;

- определение принадлежности выбранной конструкции к стандартным системам оснастки;

- установление исходных данных, необходимых для расчетов, и расчет припуска на обработку и межоперационных припусков;

- установление исходных данных для расчета оптимальных режимов обработки и их расчеты;

- установление исходных данных для расчета норм времени и их расчет;

- определение разряда работ и профессии исполнителей;

- 9) расчет точности, производительности и экономической эффективности вариантов типовых ТП с выбором оптимального варианта;

- 10) оформление документации на типовой ТП, согласование ее с заинтересованными службами и утверждение.

На предприятии должны быть компьютерные информационно-поисковые системы для поиска ранее разработанных аналогичных ТП и отдельных технологических операций.

Всю информацию вводят в компьютер в кодированном виде.

При разработке ТП анализируют технологичность сварных изделий и конструкций. Количественная оценка технологичности основывается на системе показателей, включающей в себя:

- базовые показатели технологичности, устанавливаемые в техническом задании на проектирование изделия;

- показатели технологичности, достигнутые при разработке конструкции;

- уровень технологичности (отношение достигнутых показателей к базовым).

Основными показателями технологичности являются трудоемкость и технологическая себестоимость изготовления изделия.

Факторы, влияющие на выбор показателей: требования к изделию, вид изделия, объем выпуска, наличие информации, необходимой для определения показателей.

Требования к изделию определяют, каким видом технологичности должна обладать конструкция: производственным, эксплуатационным или иным и другим, что, в свою очередь, определяет группу показателей технологичности.

В зависимости от вида изделия (сборочная единица, комплекс, комплект или деталь) из групп выбирают те показатели, которые могут характеризовать технологичность данного вида изделия.

Знание объема выпуска позволяет выбирать показатели, характеризующие расходы или затраты и имеющие наибольшую значимость при данном объеме выпуска.

### 19.1.3. НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ (НТД) НА СВАРОЧНЫЕ ТП

#### 19.1.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ НТД

Различают основные и вспомогательные документы. Основные документы бывают общего и специального назначений.

Основные документы полностью и однозначно определяют ТП (операцию) изготовления изделий и содержат информацию, необходимую и достаточную для решения инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач.

Вспомогательные документы применяют при разработке, внедрении и функционировании ТП (операции).

Правила заполнения НТД изложены в ГОСТ 3.1705–81.

Документы общего назначения применяют в отдельности или в комплекте на ТП вне зависимости от методов изготовления изделий. К ним относятся: титульный лист (ТЛ), карта эскизов (КЭ), технологическая инструкция (ТИ).

Документы специального назначения применяют при описании ТП (операции) в зависимости от видов процессов изготовления изделий, типа и вида производства. К ним относятся:

- маршрутная карта (МК);
- карта ТП (КТП);
- карта типового ТП (КТТП);
- универсальная карта КТТП (КТТП/У);
- операционная карта (ОК);
- карта типовой операции (КТО);
- комплектовочная карта (КК);
- технико-нормировочная карта (ТНК);
- карта кодирования информации (ККИ);
- ведомость технологических маршрутов (ВТМ);
- ведомость оснастки (ВО);
- ведомость оборудования (ВОБ);
- ведомость материалов (ВМ) и др.

Комплектность документов определяют в зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое) и видов разрабатываемых процессов по их организации (единичный, типовой, групповой).

Каждый разработанный документ должен иметь самостоятельное обозначение.

**Пример.** ТД-0229014, где 02 – комплект документов ТП, 2 – типовой процесс, 90 – сварка, 14 – рельефная сварка.

#### 19.1.3.2. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ЗАПОЛНЕНИЯ НТД НА СВАРКУ

Терминология и классификация видов сварки, сварных соединений, швов, оборудования и материалов должны соответствовать ГОСТ 2601–84\* и 19521–74.

Унифицированная запись наименований операций (переходов) должна выполняться в МК, КТП, КТТП, ОК, ВО, ВОБ. Применяют три формы записи: полную, краткую, по кодовым обозначениям.

Полную запись применяют в МК при маршрутном описании ТП для единичного и мелкосерийного производства, а также в МК, КТП (КТТП), ОК при операционном и маршрутно-операционном описании ТП, если входящие в операцию переходы не различаются по способу сварки.

Если же они разнятся по способу сварки, то применяют краткую запись в НТД любого вида. Краткую запись практикуют также при операционном и маршрутно-операционном описании ТП.

Нумерацию операций ТП проставляют числами ряда арифметической прогрессии 5, 10, 15 и т.д. При корректировании ТП вновь вводимым операциям присваивают промежуточные номера, не кратные 5. Унифицированная запись операции (перехода) должна содержать ключевые слова:

- наименование, номер позиции, указания на выполняемые по эскизу швы детали;
- наименование способа сварки;
- информацию о прихватках;
- наименование способа выполнения операции, перехода (по разметке, по упору и т.п.);
- особые условия сварки (положение, последовательность выполнения швов, температуру подогрева и т.п.) и дополнительные требования к выполнению операции (это указывают в графе «Особые указания»);
- информацию о безопасности труда;
- ссылку на документы, содержащие информацию, которая дополняет или разъясняет текстовую запись (чертеж, эскиз).

При описании операций указывают в технологической последовательности переходы, установки, сборки, сварки, зачистки и др., если их выполняют на том же рабочем месте, где идет сварка, и те же исполнители.

Нумерацию переходов в ТП проставляют числами натурального ряда (1, 2, 3, ...).

### 19.1.3.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КАРТЫ НА СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ

Технологическая карта – основной производственный документ, в котором приведены все данные по заготовке, сборке и сварке изделия. Она должна строго соответствовать принципиальному ТП.

Типовая технологическая карта на сборочно-сварочные работы (МК/КТП) представлена в табл. 19.1.

Кодовое обозначение операции указывают в МК, КТП (КТП) в графе «Код, наименование операции» на строке с символом «A», в ОК в графе «Код операции», в ВО (ВОб) на строке с символом «B» в графе «Код, наименование операции».

Кодовое обозначение операции соответствует структуре:

1 X	2 X	3 X	4 X	5 X	6 X
Способ реализации операций					
Наименование операции					
Вид ТП по методу выполнения					

Кодовые обозначения сборочно-сварочных операций (поз. 1 – 4) приведены в табл. 19.2.

Поз. 5, 6 устанавливают конкретизацию признаков классификации и кодов (в соответствии со спецификой отрасли).

В графе «Обозначение документа» указывают обозначения нормативных документов, применяемых при выполнении данной операции.

Карта МК/КТП содержит строки А, Б, К/М, Р (А – название операции и ее номер; Б – описание оборудования; К/М – комплектация/материалы; Р – режим).

Информация, вносимая в строку с символом «A». В графах «Цех», «Уч.», «РМ» строки указывают соответственно номер (код) цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция (или их буквенные наименования).

В графу «Опер.» заносят номер операции.

В графе «Код, наименование операции» указывают унифицированное обозначение операции ТП.

Информация, вносимая в строку с символом «Б». В графу «Код, наименование оборудования» вписывают его код, краткое наименование или модель и инвентарный номер.

Остальные графы характеризуют трудо затраты.

В графе «СМ» – «Степень механизации» – указывают степень механизации кодом или индексами: РС – ручная сборка, МС – механизированная сборка, в приспособлении, сборка по разметке.

В графе «Проф.» приводят код профессии рабочего (сборщик или сварщик).

В графике «Р» дают разряд рабочего.

В графу «УТ» – «Условия труда» – вписываются индекс: легкие (Л) или вредные (В).

В графике «КР» – «Количество работающих» – указывают число занятых на операции рабочих.

В графике «КОИД» – «Количество одновременно изготавляемых деталей» – вносят число деталей при выполнении одной операции.

В графике «ЕН» – «Единица нормирования» – называют норму расхода материала или норму времени.

В графике «ОП» – «Объем партии» – указывают ее объем в условиях серийного производства в штуках.

Графа « $K_{шт}$ » – «Коэффициент штучного времени» – соответствует многостаночному обслуживанию, и для сварочных работ ее не заполняют.

В графах « $T_{п.-3}$ » и « $T_{шт}$ » указывают нормы подготовительно-заключительного и штучного времени на выполнение операций, выбираемые на основе общемашиностроительных и отраслевых нормативов.

Информация, вносимая в строку с символом «К». В графике «Наименование детали» дают ее название по ЕСТД, допускается указывать в этой графике марку материала.

Графы «Обозначение, код» и «ОПП» (откуда поступает партия) заполняют в соответствии с ЕСТД, обычно в графике «ОПП» сообщают номер цеха.

В графике «ЕМ» – «Единица измерения массы» – приводят массу изделия в килограммах.

В графике «ЕН» – «Единица нормирования» – указывают норму расхода материала в килограммах.

В графике «КИ» вписывают число изготавливаемых изделий.

В графике « $H_{пач}$ » указывают норму расхода материалов.

## 19.1. Технологическая карта МК/КТП сборочно-сварочных работ

				Предприятие	Номер изделия					Номер комплекта документов								
Разраб.																		
Нач. бюро																		
Нормир.																		
Н.-контр.																		
A	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции					Обозначение документа								
Б	Код, наименование оборудования				СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	K <sub>шт</sub>	T <sub>пл</sub>	T <sub>шт</sub>			
K/M	Наименование детали, сб. единицы или материала				Обозначение, код					ОПП	ЕМ	ЕН	КИ	H <sub>расх</sub>				
P					Тип	Катет	Длина	Положен.		Поляр.	U <sub>к</sub>	J <sub>св</sub>	v <sub>прос</sub>					
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		

**19.2. Коды сборочно-сварочных операций**

Форма записи операции	Код
Сварка	9000
Контактная сварка	9010
Диффузионная сварка	9020
Дуговая сварка	9030
Дуговая сварка:	
– покрытым электродом	9031
– порошковой проволокой	9034
– под флюсом	9035
– в инертных газах плавящимся электродом	9039
– в инертных газах неплавящимся электродом с присадочным металлом	9041
– в инертных газах неплавящимся электродом без присадочного металла	9042
– в углекислом газе сплошной проволокой	9043
– в углекислом газе порошковой проволокой	9044
– в углекислом газе неплавящимся электродом с присадочным металлом	9045
– в углекислом газе неплавящимся электродом без присадочного металла	9046
– в смеси инертных и активных газов плавящимся электродом	9051
– в вакууме плавящимся электродом	9056
– в вакууме неплавящимся электродом с присадочным металлом	9057
– в вакууме неплавящимся электродом без присадочного металла	9058
Электрошлаковая сварка	9061
Электронно-лучевая сварка	9062
Плазменная сварка	9063
Газовая сварка	9068
Резка:	
– кислородная	9172
– кислородно-флюсовая	9176
– плазменно-дуговая	9176
Операция:	
– сборочно-подготовительная	8862
– сборочно-монтажная	8863
– слесарно-сборочная	8864
Термическая обработка	5000
Комплексный контроль геометрических параметров	0260

Окончание табл. 19.2

Форма записи операции	Код
Контроль неразрушающий:	
– акустический	0376
– вихревоковый	0377
– магнитный	0378
– радиационный	0382
– проникающими веществами	0386
Испытания:	
– механические	0620
– на герметичность	0675
Перемещение	0400
Транспортирование	0401
Складирование	0440
Правка	2156
Комплектование	0418
Крепление	0112
Базирование	8801
Разметка	0101
Гибка	2129

*Информация, вносимая в строку с символом «M».* В графе «Материал» указывают сортамент, марку материала, размер, обозначение стандарта или ТУ.

При сварке в этой графе дают также марку, диаметр присадочного материала, размер электродов, а при пайке – марку, вид припоя (проволока, фольга, порошок), диаметр и толщину припоя, данные о флюсах, средах.

При раскрое материалов в этой графе указывают профиль и размер исходной заготовки, общее число получаемых из нее деталей, коэффициент раскроя материала заготовки, норму расхода материала и т.п.

*Информация, вносимая в строку с символом «P».* В соответствующие графы вписывают информацию о технологических параметрах режима сварки: тип шва, катет и длину шва в

миллиметрах, положение шва, полярность тока, напряжение, ток и скорость подачи проволоки.

При записи применяют условные обозначения, приведенные в табл. 19.3.

В строках, обозначенных в карте МК/КТП номерами, указывают содержание технологических операций и переходов с индексом «O». При этом установки обозначают буквами А, Б, В и т.д.

Примеры заполнения строк карты МК/КТП приведены в табл. 19.4 и 19.5.

Разработанные ТП утверждают в установленном порядке. Подписи лиц, разработавшего и проверившего документ, а также ответственного за нормоконтроль, обязательны. (Если все разрабатывал один человек, то он ставит свою подпись один раз – в графе «Разработал».)

### 19.3. Буквенные обозначения и знаки

Показатель	Обозначение
Длина	$L, l$
Ширина	$B, b$
Высота, глубина	$H, h$
Толщина	$S$
Диаметр	$D, d$
Радиус	$R, r$
Межосевое и межцентровое расстояния	$A, a$
Углы	$\alpha, \beta, \gamma$ и др.
Ширина шва	$B$
Выпуклость шва	$G$
Шаг прерывистого шва	$T$
Катет углового шва	$K, \Delta$
Вогнутость углового шва	$\square$
Расчетная высота углового шва	$P$
Толщина углового шва	$A$
Сила тока	$I$
Напряжение дуги	$U_d$
Напряжение холостого хода источника питания	$U_{x.x}$
Скорость:	
– сварки	$v_{cb}$
– подачи проволоки	$v_{п.п}$
Количество	$N, n$
Плотность	$\rho$
Количество наплавленного металла	$Q_n$
Коэффициент наплавки	$\alpha_n$
Притупление кромок	$C$
Положение шва:	
– в лодочку	$L$
– нижнее	$N$
– горизонтальное	$G$
– полугоризонтальное	$\Pi_g$
– потолочное	$P$
– полупотолочное	$\Pi_p$
– вертикальное	$V$
– полувертикальное	$\Pi_v$
Полярность:	
– прямая	$P$
– обратная	$O$
Коэффициент загрузки оборудования	$K_3$

#### 19.4. Пример заполнения строк «К», «М», «Р»

A	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа												
Б	Код, наименование оборудования					СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	$K_{шт}$	$T_{шт}$	$T_{шт}$		
К/М	Наименование детали, сб. единицы или материала					Обозначение, код					ОГП	ЕМ	ЕН	КИ	$H_{расп}$			
P						Тип	Катет	Длина		Положен.		Поляр.	$U_a$	$I_{ca}$	$v_{прос}$			
K02	15	02	125	015	14	1 (1л)	Вал (Ст3, ГОСТ 380-71)		7	48	185	00	1	112	-	1	1	0,750
M04	Электрод УОНИ-13/45-3,0-2																	
M05	Проволока сварочная Св-08Г2С; D = 1,2; H = 12																	
P07						-	3	200		Н		П	20	120	16			

## 19.5. Пример заполнения строк с символами «А» и «Б»

А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	Обозначение документа														
						СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	$K_{\text{шт}}$	$T_{\text{вз}}$	$T_{\text{шт}}$				
Б	Код, наименование оборудования																			
К/М	Наименование детали, сб. единицы или материала					Обозначение, код					ОПП	ЕМ	ЕН	КИ	Н <sub>расх</sub>					
P						Тип	Катет	Длина		Положен.		Поляр.	$U_A$		$I_{\text{св}}$	$v_{\text{проб}}$				
A01	12	01	112	20	904301, механизированная		Сварщ.	3	—	1	1	1	10	—	—	34,80				
2	Дуговая сварка в углекислом газе сплошной проволокой с короткими замыканиями						Слес.	3	—	2		1				77,00				
3							Сварщ.	3	—	1						34,80				
4							Слес.	3	—	2						154,00				
B05	Кран $Q = 10$ т, инв. № 10, полуавтомат ПДГ-516						Всего									188,80				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				

## 19.2. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ НА СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В разделе представлен перечень государственных стандартов по сварочному производству и смежным ТП по состоянию на 1.01.2001 г., включающий в себя >300 наименований. Все стандарты разделены на четыре группы. В первую группу (табл. 19.6) объединены стандарты для всех видов сварки, наплавки, пайки и термической резки; во вторую группу входят стандарты на основные и сварочные материалы (табл. 19.7), третью группу составляют стандарты на сварочное оборудование и технологическую оснастку (табл. 19.8), четвертую группу составляют стандарты на виды, методы и средства контроля качества материалов,

сварных соединений и конструкций, а также средства обеспечения безопасности труда (табл. 19.9).

Здесь приняты следующие сокращения:  
ЕСКД – Единая система конструкторской документации;

ЕСТД – Единая система технологической документации;

ЕСТПП – Единая система технологической подготовки производства;

СПКП – Система показателей качества продукции;

ССБТ – Система стандартов безопасности труда.

Звездочкой отмечены стандарты, в которых есть изменения. Две звездочки говорят о том, что изменения вносились дважды.

### 19.6. Стандарты на виды сварки, наплавки, пайки и термической резки

Номер	Наименование
19521–74	Сварка металлов. Классификация
2601–84	Сварка металлов. Термины и определения основных понятий
2.312–72*	ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений
2.313–82	ЕСКД. Условные изображения и обозначения швов неразъемных соединений
3.1502–85	ЕСТД. Правила оформления документов на технический контроль
3.1705–81	ЕСТД. Правила записи операций и переходов. Сварка
3.1704–81*	ЕСТД. Правила записи операций и переходов. Пайка и лужение
29297–92	Сварка, высокотемпературная и низкотемпературная пайка, пайкосварка металлов. Перечень и условные обозначения процессов
14249–89	Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность
17349–79	Пайка. Способы
17325–79*	Пайка. Термины и определения
19248–90	Припои. Классификация
19249–73*	Соединения паяные. Основные типы и параметры
11969–79*	Сварка металлов. Обозначения основных положений сварки плавлением
5264–80*	Швы сварных соединений. Ручная электродуговая сварка. Основные типы и конструктивные элементы

Окончание табл. 19.6

Номер	Наименование
11534-75*	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами
8713-79*	Швы сварных соединений. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Основные типы и конструктивные элементы
11533-75*	Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами
15164-78*	Электрошлаковая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
14771-76*	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
14776-69*	Швы сварных соединений электрозваклепочные. Основные типы и конструктивные элементы
16037-80*	Швы сварных соединений стальных трубопроводов. Основные типы и конструктивные элементы
16098-80*	Швы сварных соединений из двухслойной коррозионно-стойкой стали. Основные типы и конструктивные элементы
14806-80*	Швы сварных соединений. Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов. Основные типы и конструктивные элементы
16038-80*	Швы сварных соединений трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава. Основные типы и конструктивные элементы
16310-80*	Швы сварных соединений из винипласта и полиэтилена. Основные типы и конструктивные элементы
14792-80	Кислородная и плазменно-дуговая резка. Точность деталей и заготовок и качество поверхности реза
15878-79	Соединения сварные, выполняемые контактной электросваркой. Основные типы и конструктивные элементы
20549-75*	Диффузионная сварка в вакууме рабочих элементов разделительных и формообразующих штампов. Типовой технологический процесс
23338-91	Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва
23870-79	Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл
25997-83	Сварка металлов плавлением. Статистическая оценка качества по результатам неразрушающего контроля

### 19.7. Стандарты на основные и сварочные материалы

Номер	Наименование
<i>Основные материалы</i>	
380–94	Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие технические требования
1050–88*	Сталь углеродистая качественная конструкционная
16523–97	Сталь листовая углеродистая качественная и обыкновенного качества общего назначения
9045–93	Сталь тонколистовая холоднокатаная малоуглеродистая качественная для холодной штамповки
4543–71	Сталь легированная конструкционная. Марки и технические требования
1051–73*	Сталь качественная калиброванная
1435–99	Сталь инструментальная углеродистая
5950–2000	Сталь инструментальная легированная
6713–91	Сталь углеродистая и низколегированная конструкционная для мостостроения. Марки и технические требования
5520–79*	Сталь листовая углеродистая и низколегированная для котлостроения и сосудов, работающих под давлением. Технические требования
5521–93*	Сталь свариваемая для судостроения. Марки, сортамент, технические требования
19281–89*	Сталь низколегированная сортовая и фасонная
535–88*	Сталь сортовая низколегированная и углеродистая обыкновенного и повышенного качества
5157–83*	Сталь прокатная. Профили разных назначений. Сортамент
8239–89	Сталь горячекатаная. Балки двутавровые. Сортамент
8509–93	Сталь прокатная, угловая равнополочная. Сортамент
8510–86*	Сталь прокатная, угловая неравнополочная. Сортамент
8240–97	Сталь горячекатаная. Швеллеры. Сортамент
2590–88	Сталь горячекатаная круглая. Сортамент
5781–82*	Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций
10884–94	Сталь стержневая арматурная термически упрочненная периодического профиля

*Продолжение табл. 19.7*

Номер	Наименование
5632-72*	Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки и технические требования
19903-74*	Сталь листовая горячекатаная. Сортамент
19904-90	Сталь листовая холоднокатаная. Сортамент
10885-85*	Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая
503-81*	Лента стальная холоднокатаная из низкоуглеродистой стали
19851-74*	Лента из углеродистой стали холоднокатаная резаная
2283-79*	Лента стальная холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали
4986-79*	Лента холоднокатаная из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали
103-76*	Сталь прокатная полосовая. Сортамент
19771-93	Уголки стальные гнутые равнополочные. Сортамент
19772-93	Уголки стальные гнутые неравнополочные. Сортамент
8278-83*	Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент
8281-80*	Сталь холодногнутая. Швеллеры неравнополочные. Сортамент
13229-78*	Сталь холодногнутая зетовая равнополочная. Сортамент
8282-83*	Профиля стальные гнутые С-образные равнополочные. Сортамент
8283-93	Сталь холодногнутая корытная равнополочная. Сортамент
9234-74*	Профиля стальные гнутые листовые с трапециевидным гофром. Сортамент
14635-93	Сталь холодногнутая специальных профилей для вагоностроения. Сортамент
11069-2001	Алюминий первичный. Марки
4784-97	Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки
21631-76*	Листы из алюминия и алюминиевых сплавов
859-78*	Медь. Марки
495-92	Листы и полосы медные
931-90	Листы и полосы латунные
2060-90**	Прутки латунные

*Продолжение табл. 19.7*

Номер	Наименование
5063–73*	Полосы из медно-никелевых сплавов
2584–86*	Провода контактные из меди и ее сплавов – бронз
1761–92	Полосы и ленты из оловянно-фосфористой и оловянно-цинковой бронз
4748–92	Полосы и ленты из кремнисто-марганцевой бронзы
19739–74*	Полосы из припоев серебряных
13498–79	Платина и платиновые сплавы. Марки
977–88	Отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали. Марки и технические требования
1412–85	Отливки из серого чугуна
1215–79**	Отливки из ковкого чугуна
7293–85	Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом
10354–82*	Пленка полиэтиленовая
10007–80*	Фторопласт-4
481–80*	Паронит
3262–75*	Трубы стальные водогазопроводные
8696–74*	Трубы стальные электросварные со спиральным швом. Общего назначения
10704–91	Трубы стальные электросварные прямозенные. Сортамент
10705–80*	Трубы стальные электросварные. Технические требования
10706–76*	Трубы стальные электросварные, прямозенные. Технические требования
10707–80*	Трубы стальные электросварные холоднотянутые и холоднокатаные. Сортамент
20295–85	Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов
5005–82*	Трубы стальные электросварные для карданных валов
12132–66*	Трубы стальные электросварные и бесшовные для мотовелопромышленности
11249–80*	Трубы стальные свертные паяные двухслойные
8732–78*	Трубы стальные бесшовные горячекатаные. Сортамент
8734–75*	Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент
9941–81	Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионно-стойкой стали
18599–83	Трубы напорные из полиэтилена

Продолжение табл. 19.7

Номер	Наименование
<i>Сварочные материалы. Сварочная проволока, прутки, электроды</i>	
2246-70*	Проволока стальная сварочная
10543-98	Проволока стальная наплавочная
9389-75**	Проволока стальная углеродистая пружинная
14963-78*	Проволока стальная легированная пружинная
1071-81*	Проволока стальная пружинная термически обработанная
7348-81*	Проволока стальная круглая для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций
18143-72*	Проволока из высоколегированной коррозионно-стойкой и жаростойкой стали
13843-78*	Катанка алюминиевая
7871-75*	Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов
5307-77*	Проволока константановая неизолированная
2179-75*	Проволока из никеля и кремнистого никеля
8803-89*	Проволока никромовая микронных размеров
16130-90	Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные
10988-75*	Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности
15527-70*	Славы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки
1066-90	Проволока латунная
5222-72*	Проволока из кремнемарганцовой бронзы. Сортамент и технические условия
18903-73*	Проволока вольфрамовая. Сортамент
18905-73*	Проволока молибденовая. Сортамент
19746-74*	Проволока из припоев серебряных
16130-90	Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные. Технические условия
21448-75*	Порошки из сплавов для наплавки. Технические условия
7222-75*	Проволока из золота, серебра и их сплавов

*Продолжение табл. 19.7*

Номер	Наименование
18389-73*	Проволока из платины и ее сплавов
18390-73**	Проволока из палладия и его сплавов
19351-74*	Проволока из иридия и родия
23949-80	Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия
21449-75*	Прутки для наплавки
25444-90	Электроды прямые и электрододержатели для контактной точечной сварки. Посадки конические. Размеры
26101-84*	Проволока порошковая наплавочная. Технические условия
26271-84*	Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия
1535-91*	Прутки медные
26467-85	Лента порошковая наплавочная. Общие технические условия
5.1215-72	Электроды металлические марки АНО-4 для дуговой сварки малоуглеродистых конструкционных сталей. Требования к качеству аттестованной продукции
9466-75*	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования
9467-75*	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы
10051-75*	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы
10052-75*	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы

*Припои*

23137-78	Припои медно-цинковые
23904-79	Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями
20485-75*	Пайка. Метод определения затекания припоя в зазор
19738-74*	Припои серебряные. Марки
20487-75*	Пайка. Метод испытаний для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства паяемого материала

*Окончание табл. 19.7*

Номер	Наименование
21547-76*	Пайка. Метод определения температуры распайки
21548-76*	Пайка. Метод выявления и определения толщины прослойки химического соединения
21549-76*	Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала
21930-76*	Припои оловянно-свинцовые в чушках. Технические условия
21931-76*	Припои оловянно-свинцовые в изделиях. Технические условия

*Флюсы*

9087-81*	Флюсы сварочные плавленые. Технические условия
22974.0 – 22974.14–96	Флюсы сварочные плавленые. Методы химического анализа
23178-78*	Флюсы паяльные высокотемпературные фторборатно- и боридногалогенидные. Технические условия
21639.0 – 21639.11-76*	Флюсы для электрошлакового переплава. Общие требования и методы определения составляющих
19250-73	Флюсы паяльные. Классификация
28555-90	Флюсы керамические для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия

*Газы*

5583-78*	Кислород газообразный технический и медицинский
6331-78*	Кислород жидкий технический и медицинский
3022-80*	Водород технический
9293-74*	Азот газообразный и жидкий
10157-79*	Аргон газообразный и жидкий
12162-77*	Двуокись (диоксид) углерода твердая (сухой лед)
8050-85*	Двуокись углерода газообразная и жидккая. Технические условия
5457-75*	Ацетилен растворенный и газообразный технический

**19.8. Стандарты на сварочное оборудование и сборочно-сварочную оснастку**

Номер	Наименование
<i>Сварочное оборудование</i>	
304–82*	Генераторы постоянного тока для электродуговой сварки
2402–82*	Агрегаты для дуговой сварки с двигателем внутреннего сгорания. Технические требования
7237–82*	Преобразователи сварочные для дуговой электросварки с генераторами постоянного тока
10594–80*	Оборудование для дуговой сварки. Ряд номинальных токов
7237–82*	Преобразователи сварочные. Общие технические условия
297–80*	Машины контактные. Общие технические условия
13821–77*	Выпрямители с крутопадающими внешними характеристиками для дуговой сварки. Основные параметры и технические требования
95–77*	Трансформаторы однофазные однопостовые для ручной электродуговой сварки
7012–77**	Трансформаторы однофазные однопостовые для автоматической электродуговой сварки под флюсом. Технические условия
25616–83	Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств
4.140–85*	СПКП. Оборудование электросварочное. Номенклатура показателей
8213–75E*	Автоматы для дуговой сварки плавящимся электродом самоходные
14651–78*	Электрододержатели для ручной дуговой электросварки. Основные параметры и технические требования
17450–78*	Тиратроны импульсные. Основные параметры
17452–78	Игнитроны. Основные параметры
16165–80	Генераторы транзисторные ультразвуковые для технологических установок. Общие технические условия
18130–79*	Полуавтоматы шланговые для электродуговой сварки плавящимся электродом
297–80*	Машины электросварочные контактные. Общие технические требования
22990–78*	Машины контактные. Термины и определения
<i>Оборудование для газопламенной обработки и пайки</i>	
13045–81*	Ротаметры общепромышленные
4.41–85*	СПКП. Машины для термической резки металлов. Номенклатура показателей

*Продолжение табл. 19.8*

Номер	Наименование
1077-79*	Горелки однопламенные универсальные для ацетиленокислородной сварки, пайки и подогрева. Типы, основные параметры и общие технические требования
5191-79*	Резаки инжекторные для ручной кислородной резки. Типы, основные параметры и общие технические требования
5614-74*	Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры
13861-89	Редукторы баллонные для газопламенной обработки. Присоединительные элементы и технические требования
9356-75*	Рукава резиновые для газовой сварки и резки металлов
18698-79*	Рукава резиновые напорные с текстильным каркасом
5191-79*	Резаки инжекторные для ручной кислородной резки. Технические требования
10796-74*	Резаки ручные воздушно-дуговые. Типы и основные параметры
5614-74*	Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры
5.917-71	Горелки ручные для аргонодуговой сварки типов РГА-150 и РГА-400. Требования к качеству аттестованной продукции
2402-82*	Агрегаты сварочные с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия
29090-91	Материалы, используемые в оборудовании для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Общие требования
29091-91	Горелки ручные газовоздушные инжекторные. Технические требования и методы испытаний
949-73*	Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $p_p \leq 20$ МПа ( $\leq 200$ кгс/см <sup>2</sup> )
5.917-71	Горелки ручные для аргонодуговой сварки
17356-89	Горелки газовые. Термины и определения
1077-79*	Горелки однопламенные универсальные для ацетиленокислородной сварки, пайки и подогрева
12221-79	Аппаратура для плазменно-дуговой резки металлов. Типы и основные параметры
<i>Сборочно-сварочная оснастка</i>	
19140-94	Вращатели сварочные горизонтальные двухстоечные. Типы, основные параметры и размеры

*Продолжение табл. 19.8*

Номер	Наименование
19141–94	Вращатели сварочные вертикальные. Типы, основные параметры и размеры
4.44–89*	СПКП. Оборудование сварочное механическое. Номенклатура показателей
19143–94	Манипуляторы сварочные. Типы, основные параметры и размеры
19140–94	Вращатели сварочные горизонтальные двухстоечные. Типы, основные параметры и размеры
19141–94	Вращатели сварочные вертикальные. Типы, основные параметры и размеры
19143–94	Вращатели сварочные универсальные. Типы, основные параметры и размеры
21694–94	Оборудование сварочное механическое. Общие технические условия
23556–95	Колонны для сварочных автоматов. Типы, основные параметры и размеры
25445–82	Барабаны, катушки и сердечники для сварочной проволоки. Основные размеры
26054–85*	Роботы промышленные для контактной сварки. Общие технические условия
26056–84*	Роботы промышленные для дуговой сварки. Общие технические условия
26408–85*	Колонны для сварочных полуавтоматов. Типы, основные параметры и размеры
27387–87	Роботы промышленные для контактной точечной сварки. Основные параметры и размеры
27776–88	Модули производственные гибкие дуговой сварки и плазменной обработки. Основные параметры
28332–89	Модули производственные гибкие дуговой сварки. Нормы надежности и основные требования к методам контроля
28920–95	Вращатели сварочные роликовые. Типы, основные параметры и размеры
28944–91	Оборудование сварочное механическое. Методы испытаний
30220–95	Манипуляторы для контактной точечной сварки. Типы, основные параметры и размеры
30260–96	Оборудование для наплавки поверхностей тел вращения. Типы, основные параметры и размеры
30261–96	Оборудование для сварки кольцевых швов. Типы, основные параметры и размеры
30275–96	Манипуляторы для контактной точечной сварки. Общие технические условия

*Окончание табл. 19.8*

Номер	Наименование
31.211.41–93	Детали и сборочные единицы сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ. Основные конструктивные элементы и параметры. Нормы точности
31.211.42–93	Детали и сборочные единицы сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ. Технические требования. Правила приемки. Методы контроля. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение
31.2031.01–91	Приспособления сборно-разборные переналаживаемые для сборки деталей под сварку. Типы, параметры и размеры
31.2031.02–91	Приспособления сборно-разборные переналаживаемые для сборки деталей под сварку. Технические условия
30295–96	Кантователи сварочные. Типы, основные параметры и размеры

*Прочие конструкции и элементы*

12169–82	Заготовки стальные, вырезанные кислородной резкой. Припуски
17131–71*	Опоки литьевые сварные из литых стальных элементов прямоугольные размерами в свету: длиной от 1000 до 1200 мм, шириной 700, 800 мм, высотой 450, 500 мм. Конструкция и размеры
2715–75*	Сетки металлические проволочные. Типы. Параметры и основные предельные размеры
8478–81*	Сетки сварные для армирования железобетонных конструкций. Сортамент и технические требования
14098–91	Соединения сварные арматуры железобетонных изделий и конструкций. Контактная и ванная сварка. Основные типы и конструктивные элементы
228–79*	Цепи якорные, сварные детали и узлы. Размеры и технические требования

*Appаратура*

8711–93	Амперметры и вольтметры. Технические требования
17791–82	Приборы электронно-лучевые. Термины и определения
2405–88	Манометры, вакуумметры и мановакуумметры показывающие. Общие технические требования
13717–84**	Приборы манометрического принципа действия показывающие электроконтактные
13646–68*	Термометры стеклянные ртутные для точных измерений
577–68*	Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм

**19.9. Стандарты на виды и методы контроля качества материалов, сварных соединений и конструкций и средства безопасности труда**

Номер	Наименование
<i>Контроль качества сварных соединений и конструкций</i>	
16504–81	Качество продукции. Контроль и испытания. Основные термины и определения
3242–79	Швы сварных соединений. Методы контроля качества
18353–79	Контроль неразрушающий. Классификация методов
18442–80*	Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы
14782–86	Швы сварных соединений. Методы ультразвуковой дефектоскопии
12503–75*	Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования
17410–78*	Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Метод ультразвуковой дефектоскопии
21397–81*	Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Основные параметры и технические требования
7512–82*	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод
23055–78*	Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля
20426–82	Контроль неразрушающий. Радиационные методы дефектоскопии. Область применения
20415–82	Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения
16971–71	Швы сварных соединений из винипласта, поливинилхлоридного пластика и полиэтилена. Методы контроля качества. Общие требования
6996–66*	Сварные соединения. Методы определения механических свойств
12004–81*	Сталь арматурная. Методы испытаний на растяжение
1497–84*	Металлы. Методы испытаний на растяжение
9454–78*	Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах
14019–80*	Металлы. Методы технологических испытаний на изгиб
23046–78*	Соединения паяные. Методы испытаний на удар

*Продолжение табл. 19.9*

Номер	Наименование
10922–90	Арматурные изделия и закладные детали сварные для железобетонных конструкций. Технические требования и методы испытаний
23240–78*	Конструкции сварные. Метод оценки хладостойкости по реакции на ожог сварочной дугой
23518–79	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
26126–84*	Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества
7122–81	Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава
10243–75*	Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры
5640–68	Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты
6032–89	Стали и сплавы. Методы испытания на межкристаллитную коррозию ферритных, аустенитно-маргантситных, аустенитно-ферритных и аустенитных коррозионно-стойких сталей и сплавов на железоникелевой основе
13585–68*	Сталь. Метод валиковой пробы для определения допускаемых режимов дуговой сварки и наплавки
5639–82	Сталь. Методы выявления и определения величины зерна
8233–56	Сталь. Эталоны микроструктуры
1778–70*	Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений
1763–68*	Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя
1429.9–77*	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения химического состава (девять стандартов)
26126–84*	Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества
23046–78*	Соединения паяные. Метод испытаний на удар
21548–76*	Пайка. Метод выявления и определения толщины прослойки химического соединения
21547–76*	Пайка. Метод определения температуры распайки
21549–76*	Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала

Продолжение табл. 19.9

Номер	Наименование
26388–84*	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением
20485–85	Пайка. Методы определения заполнения зазора припоеем
20487–85	Пайка. Метод испытаний для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства паяемого материала
26389–84*	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением
27580–88	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
16865–79*	Аппаратура рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа. Термины и определения
28277–89	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Электрорадиографический метод. Общие требования
28915–91	Сварка лазерная импульсная. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
24167–80	Соединения паяные. Метод испытаний на изгиб
24715–81	Соединения паяные. Метод контроля качества
28830–90	Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность
23667–85	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методы испытаний
23702–90	Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров
25225–82	Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод
24034–80	Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения
21104–75*	Контроль неразрушающий. Магнитно-феррозвондовый метод
24289–80	Контроль неразрушающий вихревоковый. Термины и определения
21105–87	Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод
24054–80	Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования
24522–80	Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения

*Окончание табл. 19.9*

Номер	Наименование
<i>Средства безопасности труда</i>	
4997-75*	Ковры диэлектрические резиновые
12.3.003-86*	ССБТ. Работы электросварочные. Общие требования безопасности
12.3.036-84*	ССБТ. Газопламенная обработка металлов. Требования безопасности
12.3.039-85*	ССБТ. Плазменная обработка металлов. Требования безопасности
12.4.001-80	ССБТ. Очки защитные. Термины и определения
12.1.035-81	ССБТ. Оборудование для дуговой и контактной электросварки. Допустимые уровни шума и методы измерений
12.2.007.8-75*	ССБТ. Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности
12.4.023-84*	ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Щитки защитные. Общие технические требования и методы испытаний
12.4.035-78*	ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Щитки защитные для электросварщиков. Технические условия
12.2.052-81*	ССБТ. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности
12.2.054-81*	ССБТ. Установки ацетиленовые. Требования безопасности
12.2.054.1-89	ССБТ. Установки ацетиленовые. Приемка и методы испытаний
12.2.060-81*	ССБТ. Трубопроводы ацетиленовые. Требования безопасности
P 50379-92	Герметичность оборудования и аппаратуры для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Допустимые скорости внешней утечки газа и метод их измерения
P 50402-92	Устройства предохранительные для горючих газов и кислорода или сжатого воздуха, используемые при газовой сварке, резке и аналогичных процессах. Основные понятия, общие технические требования и методы испытаний
12.2.007.8-75*	ССБТ. Оборудование электросварочное и для плазменной обработки. Требования безопасности
12.2.008-75*	ССБТ. Оборудование и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий. Требования безопасности

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 19521–74. Сварка металлов. Классификация.
2. ГОСТ 3.1102–81. ЕСТД. Стадии разработки и виды документов.
3. ГОСТ 3.1705–81. ЕСТД. Правила записи операций и переходов. Сварка.
4. ГОСТ 3.1105–84. ЕСТД. Правила оформления документов общего назначения.

5. ГОСТ 3.1502–85. ЕСТД. Правила оформления документов на технический контроль.
6. ГОСТ 3.1118–82. ЕСТД. Формы и правила оформления маршрутных карт.
7. Государственные стандарты. Указатель 2001 г. Т. 1. М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2001. 329 с.
8. Единая система технологической документации: Сб. лекций. М.: Изд-во стандартов, 1977. 192 с.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

---

---

## А

- Авторадиография** 277  
**Алгоритм** управляющий расчета режимов и технических норм времени 390  
**Аппаратура** рентгеновская импульсная 256  
**Аппараты** рентгеновские 252 – Структурная схема рентгеновской установки 252

## Б

- Бетатроны** 259 – Определение 259 – Схема ускорителей 260  
– линейные 261  
– передвижные и переносные 260  
– стационарные 260

## В

- Вентиляция** общеобменная 417, 418 – Валовые выделения вредных веществ 418 – Графики для определения скорости всасывания 420 – Оборудование 421, 422  
**Виброгашение** динамическое 424  
**Вибродемпфирование** 423 – Характеристики материалов 424

## Виброизоляция

- 422, 423  
**Влияние** дефектов на работоспособность конструкций 244 – 247

- Влияние** на свойства металла шва – скорости охлаждения 14  
– состава пламени 18  
– термической обработки 17

## Воздухоприемники

- 421, 422  
**Волны** ультразвуковые – вытекающие 284  
– головные 285  
– нормальные 284

- плоские 283  
– поверхностные (Рэлея) 283  
– продольно-поверхностные 284  
– продольные 282  
– сдвиговые (поперечные) 283  
– симметричные 284  
– сферические 283  
– цилиндрические 283

## Восстановление деталей наплавкой 221, 222

### Время вспомогательное 394

- на закрепление и открепление детали при точечной, шовной и стыковой сварке 400  
– на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности 394 – При автоматической сварке 394 – При контактной сварке 401 – При механизированной сварке 396  
– на одно перемещение сварщика с инструментом 394  
– на установку детали на стол, в приспособление или кондуктор при точечной и шовной сварке 400  
– на установку конструкций в приспособление или на рабочее место 394

## Г

## Гамма-дефектоскопы 258

- для фронтального и панорамного просвечивания 259  
– шланговые 259

## Глушители шума 426

## Д

- Диаграмма АРА** шовная 41 – Компьютерная модель 42

- Дефекты** – клееных и kleесварных соединений 243  
   – контактной сварки 242  
   – наплавки 222, 223  
   – паяных соединений 243
- Дефекты наружные** 238  
   – кратеры 238  
   – металлические включения 241  
   – наплывы 238  
   – несплавления 241  
   – непровары 240  
   – оксидные пленки 239  
   – поджоги 239  
   – подрезы 238  
   – поры 239  
   – прожоги 238  
   – трещины 240, 241  
   – шлаковые включения 239
- Дефекты сварных соединений** – подготовки и сборки 237  
   – шов 238
- Держатели** 266
- Дефектоскопы** – с накладными преобразователями 342  
   – с проходными преобразователями 343  
   – ультразвуковые 299 – 301
- 3**
- Зависимость** коэффициента от марки электрода 398
- Заземление** защитное 435
- Заземлители установок** 435
- Зануление** 438 – Значения стандартных плавких предохранителей 438
- Заполнение** строк в таблицах 450, 451
- Зарплата** рабочих – вспомогательных 378  
   – производственных 378
- Затраты** – на изготовление сварных конструкций капитальные (единовременные) 373, 374  
   – на основные материалы 376  
   – на проектно-конструкторские разработки и опытные работы 374
- на работу оборудования, используемого для выполнения сравниваемых вариантов ТП 374
- на силовую электроэнергию оборудования 375
- на смазочные и обтирочные материалы 375
- на содержание зданий 376
- на текущий ремонт и модернизацию оборудования 375
- на топливо для технологических целей 378
- на эксплуатацию инструмента 375
- на эксплуатацию приспособлений 375
- на электроды 376
- на электроэнергию для технологических целей 377
- общие 378
- Защита** – атмосферы 438 – 440  
   – от вибраций 422  
   – водоемов 440  
   – от электромагнитных полей 427 – Схема источника МП 428 – Графики распределения напряженности 428
- Защита от ионизирующего излучения** 430  
   – неиспользованного рентгеновского 431  
   – прямого  $\gamma$ -излучения 430  
   – прямого рентгеновского излучения 431  
   – рассеянного  $\gamma$ -излучения 430  
   – рассеянного рентгеновского излучения 431
- Звукоизоляция** 424 – Ограждения 424 – Кожухи 425
- Звукопоглощение** 426
- Знаки маркировочные** 265
- И**
- Изотопы** 256
- Источники** загрязнения окружающей среды  
   – сточные воды 417  
   – твердые отходы 417  
   – утилизация 417  
   – энергетические загрязнения 417

**Источники – ионизирующего излучения** 252 –

Классификация 252

– радиоактивные 256 – Радиоактивность

256 – Радиоактивный распад 256, 257

– быстрых нейтронов 258

– соотношения длины сварных швов и

массы конструкции 371

– соотношения масс наплавленного ме-

талла и конструкции 371

– унификации сварной конструкции 371

**Ксерография** 274, 275

## К

**Карбиды вольфрамовые (релиты)** 220 – На-  
плавочные материалы 221

**Карты технологические на сборочно-свароч-  
ные работы** 445, 446

**Кассеты светозащитные** 265

**Классификация** видов НТД 444

**Коды сборочно-сварочных операций** 447

**Колебания ультразвуковые** 282 – Дифракция  
291, 292 – Затухание 286 – Направлен-  
ность 285 – Определение 282 – Отраже-  
ние 287 – Поляризация 289, 290 – Свой-  
ства 285 – Трансформация 287

**Контроль – аустенитных швов** 327

- на герметичность 348 – Аппаратура  
349 – Течь 348
- наплавок 326
- радиометрический 280 – Схема 280
- с помощью позитронов 277
- ультразвуковой 299 – Расшифровка ре-  
зультатов 300 – Средства 299

**Коэффициенты – безотказности сварной кон-  
струкции** 372

- использования вертикальных электро-  
дов 436, 437
- использования горизонтального про-  
водника 437, 438
- механизации и автоматизации заготови-  
тельных работ 371
- механизации и автоматизации свароч-  
ных работ по массе наплавленного ме-  
тала 371
- механизации и автоматизации свароч-  
ных работ по протяженности швов 371
- поправочные для уточнения времени на  
сварку 388
- реверберационные 425
- сезонные для однородной земли 436

**Ленты магнитные** 331

## Л

**Марки стекол для противолазерных очков** 416

**Материалы для наплавки – высокомарганзо-  
вистые аустенитные** 210

- высокохромистые 210
- из медных сплавов 220
- коррозионно-стойкие 210
- мартенситные 210
- перлитные 210

**Материалы композиционные** 161 – Виды свя-  
зи по поверхностям раздела 164 – Клас-  
сификация 162 – Определение 161 – Ос-  
новные признаки 162 – Производство  
164 – Совместимость компонентов 163 –  
Способы получения полуфабрикатов  
165 – Характеристики 162

**Материалы присадочные** 83

**Материлоемкость** 370

- в стоимостном исчислении 370
- технологическая 370
- удельная (конструктивная) 370

**Металлы тугоплавкие** 145 – Взаимодействие с  
газами 145, 146 – Изменение структуры и  
свойств в ЗТВ 147 – Кристаллизация ме-  
тала шва 147 – Пористость при сварке  
147

**Методы измерения объема производства свар-  
ных конструкций** 366

- натуральный 366
- стоимостный (ценностный) 366
- трудовой 366
- вихревоковый 341 – Методика 341 –  
Способы 342 – Схемы 342, 343 – Чувст-  
вительность 342

- капиллярные 344 – Аппаратура 345 – Деление по способу проникающего рисунка 344 – Деление по типу проникающего вещества 344 – Методика 346, 347 – Наборы материалов 345 – Технические требования 345 – Чувствительность 348
- Методы дефектоскопии** 329
- магнитный 328 – Аппаратура 330, 331 – Обнаружение дефектов 329 – Основные параметры 328
  - магнитографический 339 – Аппаратура 340 – Методика 339 – Сущность 339 – Схема контроля 339 – Чувствительность 339
  - магнитопорошковый 334 – Аппаратура 338 – Вывляемые дефекты 334 – Методика 336 – Чувствительность 335
- Методы контроля радиационные** 248 – Единицы измерения ионизирующего излучения 248 – 250 – Классификация 252 – Связь единиц в СИ с внесистемными единицами 250
- Методы контроля УЗ – акустико-эмиссионный** 298
- дельта-метод 297, 298
  - зеркально-теневой 297
  - теневой 297
  - эхозеркальный 297
  - эхометод 296
- Методы нанесения покрытий газотермические** 224
- газопламенное напыление 227 – Достоинства и недостатки 228 – Параметры распыляемого материала и его ввода в газовое пламя 228 – Схема процесса 228
  - детонационно-газовое напыление 228 – Достоинства и недостатки 228 – Устройство детонационной пушки 228
  - металлизация электродуговая 229 – Достоинства и недостатки 230 – Схема процесса 229
  - плазменное напыление 225 – Достоинства и недостатки 227 – Классификация 226 – Конструктивные параметры 226 – Схема процесса 226 – Энергетические параметры 226
- Методы технического нормирования**
- аналитический 387
  - опытно-статистический 387
  - сравнительно-расчетный 387
- Микроструктуры соединений** 53 – 55, 57, 59
- Микротроны** 261
- Мощность** сварочных цехов производственная 358 – Определение 358 – Расчет 358 – 360
- достигнутая 358
  - плановая 358
  - проектная 358
  - среднегодовая 358
- Н**
- Намагничивание** 331 – Применение 331 – Способы 331, 333
- комбинированное 332
  - циркулярное 332
- Наплавка** 207
- газовая 208
  - индукционная 209
  - лазерная 208
  - механизированная и автоматическая под флюсом 207
  - плазменная 207
  - ручная дуговая покрытыми электродами 207
  - трением 209
  - электроконтактная 209
  - электронно-лучевая 208
  - электрошлаковая 208
  - энергией взрыва 209
- Напыление** вакуумное конденсационное (осаждение) 224 – Технологические особенности 225
- Нормативы** подготовительно-заключительного времени 396
- Нормирование** газовой резки 401 – Нормативы вспомогательного времени 403 – Основное время механизированной фигурной резки 402 – Подготовительно-заключительное время 403 – Поправочные коэффициенты 402, 403

**Нормирование сварки**

- автоматической под флюсом 393 – Вспомогательное время 394 – Основное время на сварку стыковых соединений 393
- газовой 398 – Время наплавки 1 см<sup>3</sup> металла ацетиленокислородным пламенем 398 – Основное время на разогрев свариваемых кромок 398
- контактной 399 – Вспомогательное время 400, 401 – Основное время стыковой сварки оплавлением 399 – Основное время точечной сварки 399
- механизированной – Время на электросварку 1 м длины шва 395 – Основное время на сварку швов таврового соединения 393 – Под флюсом 393
- ручной дуговой 391 – Коэффициенты наплавки 392 – Нормативы подготовительно-заключительного времени 392 – Соотношение между толщиной и диаметром электрода 392
- электрошлаковой 397 – Вспомогательное время 397

**Нормирование сварочных работ** 384 – Норма обслуживания 384 – Норма управляемости 384 – Норма численности 384 – Нормы времени 384 – Нормы выработки 384 – Нормированное задание 384 – Типовые режимы труда и отдыха 386

**Нуклиды** 256

**О**

**Образцы для УЗ контроля** 310 – 314

**Оплата труда** 368

- аккордная 369
- повременная 369
- прямая сдельная 368
- сдельно-прогрессивная 369

**Организация стационарных рабочих мест** 411, 412

**Освещение** сварочных и сборочно-сварочных цехов 410

**Отчисления амортизационные** 374, 375

**Охлаждение** легированных сталей при сварке 44, 45 – Скорости 44, 45

**Охрупчивание** 56 – Разрушения соединений 58

- высокотемпературное 84
- под воздействием агрессивных сред 85
- радиационное 85

**П**

**Панели вытяжные** 421

**Пленки** радиографические 262 – Классификация и характеристики 262 – Номограммы для определения времени экспозиции 272 – Номограммы областей применения 271 – Расшифровка снимков 273 – Схемы контроля соединений 271 – Типы 270 – Фотообработка 273

**Подсистема** технического нормирования сварочных операций автоматизированная 389

**Пожаро- и взрывобезопасность** 413

**Показатели** качества процесса изготовления конструкций в сборочно-сварочном производстве 442

**Показатели** производительности труда 366

- натуральные 366, 367
- стоимостные 367
- трудовые 367

**Покрытия** – Виды 224 – Классификация методов 230 – Определение 224

- износстойкие 234
- коррозионно-стойкие 233
- тепло- и жаростойкие 233

**Порошки** магнитные 331

**Правила** заполнения НТД 444

**Предельно допустимые** концентрации вредных веществ 408

**Преобразователь** совмещенный 292 – Акустическое поле 293 – Акустический тракт 293 – 295 – Акустические характеристики материалов 296 – Диаграмма направленности 293 – Поле излучения-приема 295

**Преобразователи** в дефектоскопии 330

- индукционные 330
  - магниторезисторные 331
  - феррозондовые 331
  - холловские 331
- Преобразователи УЗ** 302 – Конструкции 303 – Применение 302 – 305
- Приборы инфракрасные** 350
- Проволока стальная** 212
  - наплавочная порошковая 215 – Химический состав 216
  - наплавочная сплошного сечения 214
  - сварочная 212 – Области применения 213
  - сварочная сплошного сечения 214
- Производство сварочное** 353 – Определение оптимального размера 354 – Показатели оценки концентрации 353 – Преимущества крупных сварочных производств 354 – Сущность процесса 353 – Формы концентрации 353
  - специализированное 355 – Внутриаводская специализация 356 – Определение процесса 355 – Отраслевая специализация 356 – Подетальная специализация 356 – Предметная специализация 355 – Технологическая специализация 356 – Ход создания 355 – Условия повышения уровня специализации 356
- Процесс сварки** 442
  - перспективный 442
  - рабочий 442
  - типовой 443 – Технологичность 443 – Требования к изделию 443 – Факторы, влияющие на выбор показателей 443 – Этапы разработки 443
- Прутки для наплавки** 220 – Области применения литых прутков 220
- P**
- Радиография** 275
  - нейтронная 276
  - протонная 277
  - цветовая 275
- Радиоскопия** 277
- Расчет** – дополнительных затрат на изготовление конструкции 372
  - количества необходимого производственного оборудования 373
  - стоимости сварной конструкции 371
  - удельных затрат на 1 т спроектированной конструкции 372
  - числа единиц транспортных средств прерывного действия 373
  - числа мостовых кранов 373
  - числа средств непрерывного транспорта или конвейеров 374
  - экономического эффекта 380 – Выбор вариантов 380 – Затраты на реализацию мероприятий НТП 382 – Коэффициенты приведения 381 – Коэффициенты реновации основных фондов 383 – Социальные и экологические результаты – 382
- Расчеты экономические** 370
  - технологических процессов изготовления сварных конструкций при их разработке (совершенствовании) 373 – 380
  - сварных конструкций на стадии проектирования и производства 370 – 372
- Рентген-видикопы** 280
- Работы в сварочном производстве промышленные** 360 – Варианты конструкции 360, 361 – Выбор 364 – Классификация 361 – 363 – Снижение стоимости 364
- C**
- Сварка**
  - волокнистых и дисперсно-наполненных КМ 170 – Зоны 171 – Методы 172, 173 – Распределение максимальных температур 171
  - комбинированных конструкций 181 – Композиции наплавленного металла и термообработки 183 – 186 – Сварочные материалы 183 – Способы и режимы 181, 182
- Сварка композиционных сплавов** 166 – Классификация по межфазному взаимодействию 166

- аргонодуговая 166 – Механические средства соединений 167 – Режимы 167
- лазерная 169 – Дефекты 169 – Механические свойства 170 – Режимы 169
- электронно-лучевая 168 – Режимы 168

**Сварка конструкционных средне- и высокоуглеродистых сталей 31**

- в углекислом газе 32
- газовая 31
- контактная 32
- под флюсом 32
- покрытыми электродами 32
- ЭШС 32

**Сварка меди 193**

- с алюминием 193 – Латентный период 194 – Свойства соединений 194 – Способы 194 – 196 – Устойчивые соединения 193
- с титаном 196, 197 – Взаимная растворимость 197 – Интерметаллидные соединения 197 – Способы 197 – 200 – Режимы 198, 199
- с тугоплавкими металлами 200, 201

**Сварка меди со сталью 189, 190 – Приемы 191, 192**

- взрывом 190
- диффузионная 190
- контактная 191
- плавлением 191
- прокаткой 190
- трением 190
- ультразвуковая 191

**Сварка медных сплавов 117**

- автоматическая под флюсом 119 – Режимы 120 – Сварочные материалы 120
- газовая 122 – Газовая горелка 122 – Диаметры присадочной проволоки 123
- дуговая в вакууме 122 – Режимы 122
- дуговая в защитных газах 118 – Марка присадочного материала 119 – Режимы 118
- дуговая покрытыми электродами ручная 120 – Применение 121 – Режимы 121
- плазменная 121
- электронно-лучевая 121

- электрошлаковая 123

**Сварка низкоуглеродистых сталей 18**

- газовая 18
- дуговая в защитных газах 23 – Механические свойства металла швов 23 – 25
- дуговая покрытыми электродами ручная 19
- контактная 26 – Режимы 28 – 31
- под флюсом 19 – Режимы 20 – 22
- самозащитной порошковой проволокой 25 – Технологические характеристики 25
- электрошлаковая 26 – Механические свойства металла швов 26 – Режимы 27

**Сварка плавлением 60 – Выбор режима 60 – Послесварочная термообработка 64 – Сварочные материалы 62, 63 – Эксплуатационные свойства 64 – Электроды 61**

**Сварка стали с алюминием 187**

- взрывом 188
- диффузионная 188
- клинопрессовая 188
- пайко-сварка 189
- плавлением 189
- прокаткой 189
- трением 188
- ультразвуковая 188

**Сварка сталей с титановыми сплавами 192**

- взрывом 192, 193
- клинопрессовая 193
- контактная 193
- прокаткой 193
- ультразвуковая 193

**Сварка титана с алюминием 201 – Режимы 202, 203, 205 – Соединения 209 – Схемы сварки 203 – 206 – Температурно-временные зависимости 201**

**Сварка титановых сплавов 128 – Подготовка под сварку 129 – Состав растворов для химической обработки 129 – Температуры полиморфного превращения, рекристаллизации, отжига и снятия остаточных напряжений 131**

**– дуговая в защитных газах 132 – Конструктивные схемы защиты труб 135 –**

- Механические свойства соединений** 134 – Режимы 135 – Схемы горелок 133 – Схемы защиты соединения 134 – Химический состав инертных газов 132 – под флюсом 139 – Механические свойства металла шва 140 – Режимы контактной сварки 142, 143 – Режимы ЭШС 140, 141 – Технологические параметры контактной сварки 139
- Сварка циркония и его сплавов** 148 – Механические свойства 150 – Подготовка под сварку 148 – диффузионная 150 – дуговая 148 – Режимы 149 – контактная 150 – электронно-лучевая 148 – Режимы 148
- Сварка титана** 90 – газовая 90 – дуговая 93 – Механические свойства металла шва 94 – Химический состав наплавленного металла 94 – Холодная 93 – дуговая с подогревом 95
- Светильники** 415, 416
- Системы электромагнитного контроля полеза-дающие** 342
- Сканирование** 309 – Операции и схемы кон-троля соединений 325 – Способы 309 – Характеристики дефектов 314 – 316
- Состав химический** 235, 236 – гранулированных порошков 235 – сплавов типа сормайта 236 – сплавов типа стеллита 236
- Сплавы** 97 – алюминиевые и магниевые 97 – Вольфрамовые включения 106 – Категории ответственности соединений 108 – Коррозионная стойкость 107 – Коэффициент разупрочнения основного металла 108 – Марки и свойства 97 – Механические свойства полуфабрикатов 101 – 103 – Механические свойства соедине-ний 107 – Оксидные пленки 105 – Особенности технологии сварки 106, 107 – Пористость 105, 106 – Работоспособ-ность и пластичность соединений 109, 110 – Свариваемость 97, 98 – Сопротивляемость ГТ 97 – Химический со-став 98 – 106 – Эксплуатационные свойства 111 – 113 – медные 114 – Бронзы 116 – Сварива-емость 116, 117 – Химический состав ла-туней 115 – Химический состав меди 114 – никелевые 79 – Жаропрочность сварных соединений 83, 84 – Свариваемость 81 – Сопротивляемость металла шва образо-ванию ГТ 83 – Структура и свойства 81 – Факторы склонности к ГТ 81, 82 – Характеристика 79 – Химический со-став 80 – титановые 124 – Группы легирующих элементов по влиянию на полиморфизм титана 124 – Критерии свариваемости 128 – Меры по борьбе с трещинообра-зованием 126, 127 – Механические свойства 126, 127 – Номинальный со-став 125 – Проблемы свариваемости 128
- Сплавы на основе**
- молибдена, вольфрама и хрома-156 – Достоинства и недостатки 156, 157 – Режимы сварки 157 – 159 – Способы сварки 157 – 161 – Характеристика ме-таллов 156
  - ниobia, ванадия, tantalа 150 – Механи-ческие свойства соединений 154 – Особенности 151 – Преимущества 150, 151 – Применение 150, 151 – Режимы сварки 152 – Способы сварки 152, 153
- Способы прозвучивания сварных соединений** 318 – многократно отраженным лучом 319 – по слоям 319 – прямым и однократно отраженным лу-чом 319 – прямым лучом 319
- Способы исправления дефектов** 248
- Средства защиты от лазерного излучения** 430
- Средства индивидуальной защиты** 413

- для органов дыхания 413
  - защитные щитки 413
  - очки 414, 415
  - эмблемы 413
- Стали аустенитные** 47 – Механические свойства 52 – Образование горячих трещин 52 – 55 – Свариваемость 54 – Свойства 50 – Структурная диаграмма Шеффлера 50 – Термофизические свойства 52 – Характеристика 47 – Химический состав 48, 49
- Стали легированные и теплоустойчивые** 32 – Химический состав 35 – 36
  - машиностроительные 34 – Исходная концентрация диффузионного водорода 39 – Механические свойства 36, 37
  - строительные 33 – Категории 33 – Основные требования 33
- Стали разнородные** 174 – Диффузионные процессы 178 – 180 – Классификация 174, 175 – Кристаллизация ванны 177, 178 – Определение 174 – Послесварочная обработка 181 – Свариваемость 176 – Свойства 175 – Схема определения структуры швов 176
- Стали хромистые** 64 – Группы 65 – Классы 65
  - Применение 64 – Свойства 65
  - аустенитно-ферритные 75 – Коррозионная стойкость 77 – Механические свойства 77 – Сварочные материалы 78 – Способы сварки 78 – Применение 79 – Химический состав 76
  - мартенситные 65 – Механические свойства 67, 69 – Рекомендации по тепловому режиму 68 – Сварочные материалы 69 – Способы сварки 69 – Химический состав 66
  - мартенситно-ферритные 70 – Механические свойства 70 – Рекомендации по тепловому режиму 71 – Сварочные материалы 71 – Способы сварки 71 – Химический состав 71
  - ферритные 72 – Механические свойства 73 – Применение 72 – Рекомендации по тепловому режиму 74 – Сварочные ма-
- териали 74 – Способы сварки 74 – Химический состав 73
- Стали конструкционные** 10
  - низкоуглеродистые 13 – Свариваемость 13 – Схема строения ЗТВ 14 – Химический состав металла шва 13
  - углеродистые 10 – Механические свойства 12 – Ударная вязкость 12 – Химический состав 10, 11
- Стандарты** 452
  - на виды и методы контроля 461 – 463
  - на сварочное оборудование и сборочно-сварочную оснастку 458
  - на сварочные процессы 452 – 457
- Схемы контроля соединений** 320
  - нахлесточных 324
  - стыковых с подкладкой 322
  - тавровых и угловых 324
  - труб 320 – 322
- Т**
- Температура** сопутствующего подогрева 46, 47 – Зависимость от погонной энергии 46
- Технология** – нанесения покрытий 231 – Механическая обработка 233 – Обработка напыленных покрытий 232 – Оплавление 232 – Подготовка поверхности напыляемых изделий 231 – Подготовка порошков 231 – Пропитка 232 – Снятие остаточных напряжений 232 – Спекание 232 – Схема 234
  - радиографического контроля 266 – Параметры 266 – Техника контроля 267 – Толщина материала 268 – Фокусное расстояние 269 – Форма дефектов и их ориентация в шве 268 – Энергия излучения 267
- Течеискатели** 349
  - акустические 350
  - галогенные 349
  - масс-спектрометрические 349
  - электронозахватные 349
- Толщина** – защиты из стали 434

– защитного экрана из свинца и бетона  
431 – 433

**Томография** 281**Требования** 411

- защиты окружающей среды 414
- к персоналу 413
- к сварочным материалам и заготовкам  
411

**Трубки рентгеновские** 253 – Действительное

- фокусное пятно 253
- с вращающимся анодом 254
- с вынесенным анодом 254

**Трудоемкость** сварочной конструкции 370

- общая 370
- удельная 371

**У****Уровни допустимые** 409

- напряженности магнитных полей 409
- шума на рабочих местах 409

**Ускорители заряженных частиц** 261**Устройства** манометрические 350**Ф****Факторы** производства, негативно влияющие

- на окружающую среду 405
- психофизиологические 405, 406
- физические 405, 406
- химические 405, 406

**Флюорография** 275**Ц****Циклы термические** 43

- в корне шва 56
- многослойной сварки 43

**Ч****Чугуны** – Классификация 89 – Особенности  
сварки 89 – Состав присадочных прутков  
91, 92 – Способы сварки 90 – Флюсы для  
пайко-сварки 92 – Характеристика 89**Э****Экранны** – металлические и флуоресцентные  
усиливающие 263, 264

- сцинтилляционные 278
- флуороскопические 278
- электролюминесцентные 278

**Электроды** 211

- наплавочные ленточные 217 – Области  
применения 217 – Химический состав  
наплавленного металла с применением  
порошковой ленты 218 – Химический  
состав ленты наплавочной спеченной на  
основе железа 219 – Химический состав  
ленты стальной холоднокатаной для  
наплавки под флюсом 218
- покрытые 211 – Области применения  
211 – Химический состав 212

**Эталоны** чувствительности 264, 265 – Типы 265**Эхометод** 306 – Мертвая зона 306 – Параметры  
306 – Уровни чувствительности 307

## СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Николай Павлович Алешин,  
Георгий Георгиевич Чернышов,  
Александр Иванович Акулов и др.**

## СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ

Справочник. В 2-х томах

### Том 2

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.01 г.

Редактор *А.П. Лебедева*

Художественный редактор *Т.Н. Погорелова*

Корректоры: *М.Я. Барская, Т.И. Масальская, Е.М. Нуждина, М.С. Рослякова*

Инженер по компьютерному макетированию *Т.А. Сынкова*

Сдано в набор 25.02.04. Подписано в печать 02.08.04. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 39,0. Уч.-изд. л. 44,00.

Тираж 3000 экз. Заказ 10498

ОАО «Издательство «Машиностроение»,  
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Оригинал-макет подготовлен в издательско-полиграфическом центре

Тамбовского государственного технического университета,

392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, к. 201

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
представленного оригинала-макета в ГУП ППП «Типография «Наука» РАН  
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6