

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.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ
УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Р.Х. ГАФАРОВ, Р.Г. ШАРАФИЕВ, Р.Г. РИЗВАНОВ

К Р А Т К И Й С П Р А В О Ч Н И К
И Н Ж Е Н Е Р А - М Е Х А Н И К А

Основные формулы и справочные данные
по расчетам на прочность

УФА 1995

ББК 30 121+34 43

УДК 539 3/4 + 539 1 + 620 17 031

Г12

Гафаров Р.Х. , Шарафиев Р.Г. , Ризванов Р.Г. Краткий справочник инженера-механика Основные формулы и справочные данные по расчетам на прочность. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1995 – 112 с ISBN 5-230-19001-9.

В справочнике приведены основные формулы и справочные данные относящиеся к расчетам на прочность типовых элементов конструкций

Предназначен для инженеров различных специальностей, сталкивающихся в повседневной практической деятельности с расчетами на прочность, преподавателей и студентов высших технических учебных заведений

Табл. 30 Ил. 45 Библиогр. 23 назв.

Рецензенты: директор Башкирского научно-исследовательского института нефтяного машиностроения, канд. техн. наук Б.Е. Сельский,
доктор техн. наук, профессор И.Р. Кузеев (УГНТУ)

Редактор издательства Л.А. Маркешина

Г $\frac{5001000000-139}{4K4(03)-95}$ Без объявл. – 95 ISBN 5-230-19001-9

© Гафаров Р.Х. , Шарафиев Р.Г. , Ризванов Р.Г. , 1995

© Уфимский государственный нефтяной
технический университет, 1995

ПРЕДИСЛОВИЕ

В каждодневной деятельности инженеру приходится часто выполнять оценочные расчеты на прочность типовых элементов конструкций. Для этого он должен всегда иметь под рукой важнейшие формулы и справочные данные, используемые в расчетах. В нашей стране изданы многотомные справочные издания, написанные на высоком научно-теоретическом уровне и содержащие достаточно полное изложение основных результатов современной науки о прочности. Но эти книги ориентированы на конструкторов и расчетчиков, имеющих глубокую теоретическую подготовку в области прочности. Инженерам-практикам они зачастую недоступны. Именно для них предназначен в первую очередь настоящий справочник.

Материал справочника состоит из двух разделов.

В первом разделе представлены основные формулы, относящиеся к расчетам как при простых видах деформации (растяжение и сжатие, кручение, изгиб), так и при сложном сопротивлении (косой изгиб, внецентренное продольное нагружение, изгиб с кручением) в условиях статического и динамического нагружения; расчетам на устойчивость, расчетам статически неопределимых систем, кривых стержней, тонкостенных и толстостенных сосудов.

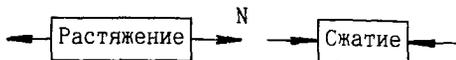
Второй раздел содержит обширные справочные данные, используемые в расчетах на прочность: таблицы сортамента стандартных прокатных профилей, данные по расчетам на устойчивость, важнейшие физико-механические характеристики конструкционных материалов, современные обозначения расчетных величин согласно международному стандарту ИСО, нормальные линейные размеры, данные по расчетам на выносливость в соответствии с последним отечественным стандартом.

Мы надеемся, что "Краткий справочник инженера-механика" окажется полезным не только инженерам-практикам в их каждодневной деятельности, но также преподавателям и студентам технических вузов.

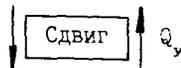
ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. ВНУТРЕННИЕ СИЛОВЫЕ ФАКТОРЫ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАГРУЖЕНИЯ

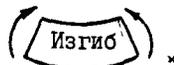
N - продольная сила



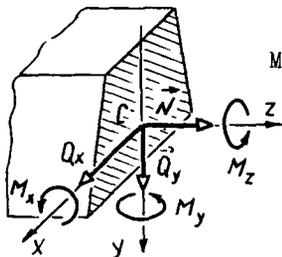
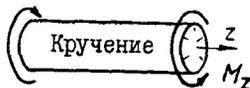
$Q_x (Q_y)$ - поперечные силы



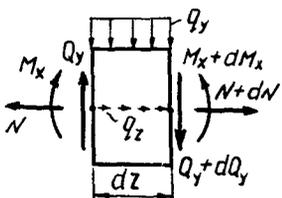
$M_x (M_y)$ - изгибающие моменты



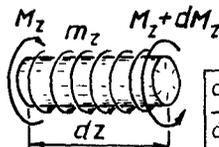
M_z - крутящий момент



Д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы е
з а в и с и м о с т и



$$\begin{aligned} dN/dz &= -q_z \\ dQ_y/dz &= -q_y \\ dM_x/dz &= Q_y \end{aligned}$$



$$\frac{dM_z}{dz} = -m_z$$

И н т е г р а л ь н ы е з а в и с и м о с т и

$$N = N_0 - \int_0^z q_z dz, \quad Q_y = Q_0 - \int_0^z q_y dz, \quad M_z = M_0 - \int_0^z m_z dz,$$

$$M_x = M_0 + \int_0^z Q_y dz = M_0 + \omega_Q$$

Ч а с т н ы е с л у ч а и

$q_z (q_y) = \pm q, m_z = \pm m$	$q_z (q_y) = 0, m_z = 0$
$N = N_0 \pm qz$	$N = N_0 = \text{const}$
$Q_y = Q_0 \pm qz$	$Q_y = Q_0 = \text{const}$
$M_z = M_0 \pm mz$	$M_z = M_0 = \text{const}$
$M_x = M_0 + Q_0 z \pm 0,5 qz^2$	$M_x = M_0 + Q_0 z$

2. ЦЕНТРАЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЯ

Распределение нормальных напряжений

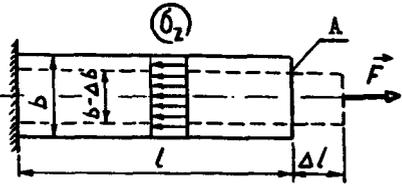
$$\sigma_z = N/A$$

Условие прочности $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$.

Допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \sigma_{\text{пред}} / [n],$$

$$\sigma_{\text{пред}} = \begin{cases} \sigma_T(\sigma_{0,2}) & \text{— для пластичных материалов,} \\ \sigma_{\text{ПЧ}} & \text{— для хрупких материалов.} \end{cases}$$



Материалы

- хрупкие, если $\delta < 5\%$
- пластичные, если $\delta > 5\%$

Нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$ равен: для пластичных высокооднородных материалов (сталь, сплавы алюминия, титана, магния и меди) – 1,5...2,5; для чугуна – 4...6; для дерева – 8...10.

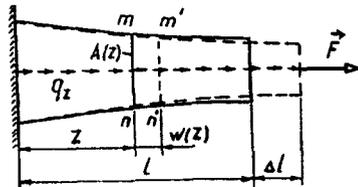
Ориентировочные значения допускаемых напряжений на растяжение (в МПа): стали углеродистые – 140...250; стали легированные – 100...400; бронза – 60...120; латунь – 70...140; дюралюминий – 80...150; чугун – 30...80; сосна (вдоль волокон) – 10.

Относительные деформации:

- продольная $\epsilon = \Delta l/l$,
- поперечная $\epsilon' = \Delta b/b$.

Закон Пуассона

$$\epsilon' = -\nu \epsilon$$



Коэффициент Пуассона лежит в

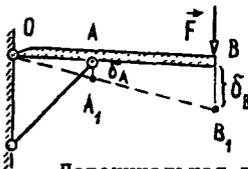
пределах $0 \leq \nu \leq 0,5$ (пробка $\nu = 0$, сталь $\nu = 0,3$; резина $\nu = 0,5$).

Закон Гука

$$\sigma = E \epsilon$$

, где E – модуль Юнга.

Материал	Дерево	Бетон	Дюраль	Медь	Титан	Чугун	Сталь	Алмаз
E, ГПа	10	20	70	100	100	120	200	1050



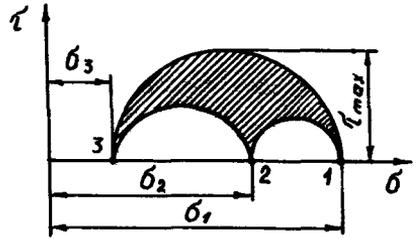
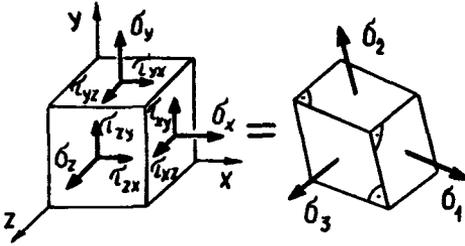
$$\text{Удлинение стержня } \Delta l = \int_0^l N dz / EA(z).$$

В частном случае, когда $N=F=\text{const}$ и $EA=\text{const}$,
 $\Delta l = Fl/EA$.

Условие жесткости $\delta \leq [\delta]$.

$$\text{Потенциальная энергия упругой деформации } U = \int_0^l N^2 dz / (2EA).$$

3. ТЕОРИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ



$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

$$\tau_{\max} = 0,5 (\sigma_1 - \sigma_3)$$

Закон парности касательных напряжений

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Обобщенный закон Гука

$$\begin{cases} \epsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E, & \gamma_{xy} = \tau_{xy}/G, \\ \epsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]/E, & \gamma_{yz} = \tau_{yz}/G, \\ \epsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E, & \gamma_{zx} = \tau_{zx}/G. \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Модуль сдвига} \\ G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \end{array}$$

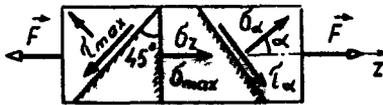
Относительное изменение объема $\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \sigma / K$,
где $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$, $K = E/3(1-2\nu)$ - модуль объемной упругости.

Удельная потенциальная энергия упругой деформации:

- полная $u = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] / 2E$;

- изменения объема $u_{об} = \sigma^2 / 2K$;

- изменения формы $u_{\phi} = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 12G$.



3.1. Линейное напряженное состояние
(два главных напряжения равны нулю)

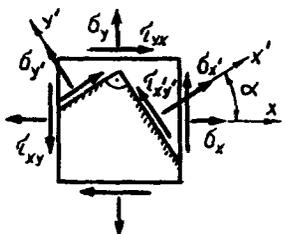
$$\sigma_{\alpha} = \sigma_z \cos^2 \alpha, \quad \tau_{\alpha} = 0,5 \sigma_z \sin 2\alpha$$

Наибольшее нормальное напряжение

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\alpha/\alpha=0} = \sigma_z$$

Наибольшее касательное напряжение

$$\tau_{\max} = \tau_{\alpha/\alpha=45^\circ} = 0,5 \sigma_z$$



3.2. Плоское напряженное состояние (одно из главных напряжений равно нулю)

$$\begin{cases} \sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \tau_{x'y'} = -0,5(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha, \end{cases}$$

$$\sigma_{\max/\min} = 0,5[(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}],$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max/\min} = (\sigma_{\max/\min} - \sigma_x) / \tau_{xy}.$$

Чистый

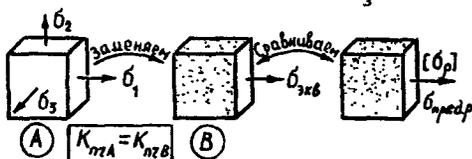
$$\text{сдвиг: } \sigma_x = \sigma_y = 0, \tau_{xy} = \tau, \sigma_{\max/\min} = \pm \tau.$$

Главные напряжения: $\sigma_1 = +\tau, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau, \alpha_3 = \pm 45^\circ$.



4. ГИПОТЕЗЫ ПРОЧНОСТИ

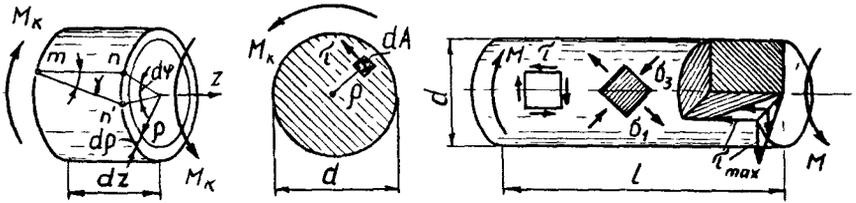
Они используются для оценки прочности конструкций в случае плоского и объемного напряженных состояний. Исходя из принятого критерия эквивалентности, лежащего в основе той или иной гипотезы прочности, сложное напряженное состояние заменяется эквивалентным ему растяжением.



Условие прочности представляется в виде одного из следующих неравенств: $\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma_p] = \sigma_{\text{пред.р}} / [n]$ или $n = \sigma_{\text{пред.р}} / \sigma_{\text{экв}} \geq [n]$

Название, автор	Крит. проч.	Эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$	Область примен.
Гипотеза наиб. нормальных напряжений (Галилей, XVII в.)	σ_{\max}	σ_1	Не рекомендуется
Гипотеза наиб. линейных деформаций (Мариотт, 1682 г.)	ϵ_{\max}	$\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$	Не рекомендуется
Гип. наибольш. касательных напряжений (Кулон, 1773 г.)	τ_{\max}	$\sigma_1 - \sigma_3$	Для пластичных материалов, у которых
Гипотеза энергии формоизменения (Губер, 1904 г.)	u_ϕ	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$	$\sigma_{\text{ТР}} = \sigma_{\text{ТС}}$
Гипотеза О.Мора (Мор, 1882 г.)	$\tau_n = f(\sigma_n)$	$\sigma_1 - m \sigma_3$ $m = \begin{cases} \sigma_{\text{ТР}} / \sigma_{\text{ТС}} & \text{пласт. мат.} \\ \sigma_{\text{ПЧР}} / \sigma_{\text{ПЧР}} & \text{хрупкие мат} \end{cases}$	Для пластичных и хрупких материалов

5. КРУЧЕНИЕ КРУГЛЫХ ВАЛОВ



Угол сдвига $\gamma = \rho d\varphi / dz$.

Распределение касательных напряжений

$$\tau = (M_k / I_p) \rho$$

Максимальное касательное напряжение

$$\tau_{\max} = M_k / W_p$$

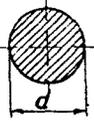
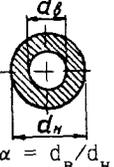
Геометрические характеристики:

— полярный момент инерции

$$I_p = \int_A \rho^2 dA,$$

— полярный момент сопротивления

$$W_p = I_p / \rho_{\max}$$

форма		
I_p	$\frac{\pi d^4}{32} \approx 0,1d^4$	$\frac{\pi d_H^4}{32} (1 - \alpha^4)$
W_p	$\frac{\pi d^3}{16} \approx 0,2d^3$	$\frac{\pi d_H^3}{16} (1 - \alpha^4)$

Углы закручивания:

— относительный $\theta = d\varphi / dz = M_k / (GI_p)$,

— абсолютный (при $M_k = M = \text{Const}$) $\varphi = M_k l / (GI_p)$.

Расчет валов сводится к одновременному удовлетворению 2 условий:

— условия прочности

$$\tau_{\max} = M_{k\max} / W_p \leq [\tau], \quad \text{откуда } d_{\text{пч}} \geq \sqrt[3]{\frac{16 M_{k\max}}{\pi [\tau]}}$$

— условия жесткости

$$\theta_{\max} = M_{k\max} / (GI_p) \leq [\theta], \quad \text{откуда } d_{\text{ж}} \geq \sqrt[4]{\frac{32 M_{k\max}}{\pi G [\theta]}}$$

Допускаемые величины:

— касательное напряжение

$$[\tau] = \begin{cases} (0,55 \dots 0,60) [\sigma_p] & \text{— для стали;} \\ (1,0 \dots 1,2) [\sigma_p] & \text{— для чугуна;} \end{cases}$$

— относительный угол закручивания

$$[\theta] = 3,5 \dots 17,5 \text{ рад/м} \quad (0,20 \dots 1,0 \text{ град/м}).$$

Потенциальная энергия упругой деформации $U = \int_0^l M_k^2 dz / (2GI_p)$.

6. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

Статические моменты

$$S_x = \int y dA, \quad S_y = \int x dA.$$

Координаты центра тяжести

$$X_c = S_y / A, \quad Y_c = S_x / A.$$

Моменты инерции:

$$- \text{осевые} \quad I_x = \int y^2 dA, \quad I_y = \int x^2 dA;$$

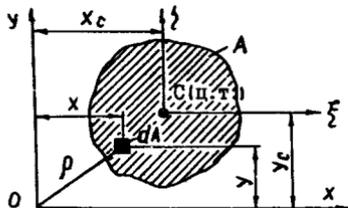
$$- \text{центробежный} \quad I_{xy} = \int xy dA;$$

$$- \text{полярный} \quad I_p = \int \rho^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y.$$

$$\text{Радиусы инерции} \quad i_x^2 = I_x / A, \quad i_y^2 = I_y / A.$$

Преобразование моментов инерции при параллельном переносе осей (переход от центральных осей $\xi\eta$ к произвольным xy)

$$I_x = I_\xi + Y_c^2 A, \quad I_y = I_\eta + X_c^2 A, \quad I_{xy} = I_{\xi\eta} + X_c Y_c A.$$



$x_c = 0,5b; y_c = 0,5h$	$y_c = h/3$	$\xi_c = \eta_c = 0$	$y_c = 4R/3\pi \approx 0,42R$
$I_\xi = bh^3/12$	$I_\xi = bh^3/36$	$I_\xi = I_\eta = \pi R^4/4$	$I_\xi = I_\eta = 0,055R^4$
$I_x = bh^3/3$	$I_x = bh^3/12$	$I_p = \pi R^4/2$	$I_x = I_y = \pi R^4/16$

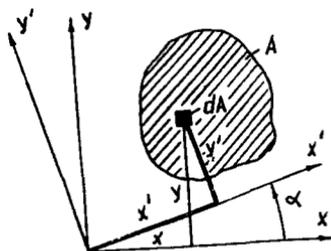
Преобразование моментов инерции при повороте осей

$$\begin{cases} I_{x'} = I_x \cos^2 \alpha + I_y \sin^2 \alpha - I_{xy} \sin 2\alpha, \\ I_{y'} = I_x \sin^2 \alpha + I_y \cos^2 \alpha + I_{xy} \sin 2\alpha, \\ I_{x'y'} = 0,5(I_x - I_y) \sin 2\alpha + I_{xy} \cos 2\alpha. \end{cases}$$

Главные моменты инерции

$$I_{\max/\min} = I_{1,2} = 0,5 \left[(I_x + I_y) \pm \sqrt{(I_x - I_y)^2 + 4 I_{xy}^2} \right].$$

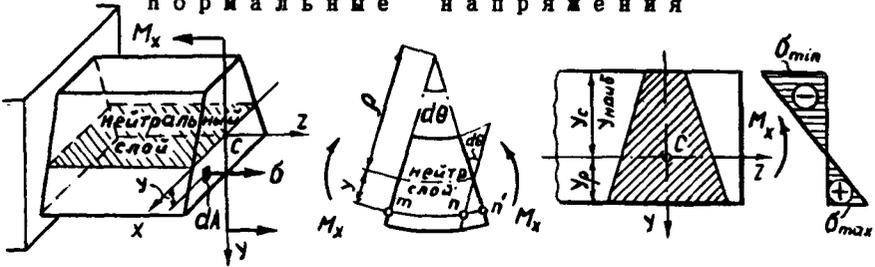
$$\text{Положение главных осей} \quad \operatorname{tg} \alpha_{\max/\min} = (I_x - I_{\min/\max}) / I_{xy}.$$



7. ПЛОСКИЙ ПРЯМОЙ ИЗГИБ

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ

Нормальные напряжения



Кривизна оси балки

$$I / \rho = M_x / (EI_x).$$

Распределение нормальных напряжений

$$\sigma = \frac{EY}{\rho} = \frac{M_x}{I_x} Y$$

Условия прочности:

- для хрупких материалов

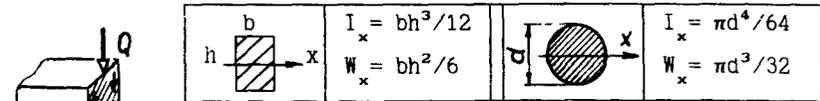
$$\begin{cases} \sigma_{\max} = (M_{\max} / I_x) Y_p = M_{\max} / W_p \leq [\sigma_p], \\ \sigma_{\min} = (M_{\max} / I_x) Y_c = M_{\max} / W_c \leq [\sigma_c], \end{cases}$$

где $W_p = I_x / Y_p$ и $W_c = I_x / Y_c$ - моменты сопротивления соответственно растянутых и сжатых волокон;

- для пластичных материалов

$$\sigma_{\text{наиб}} = (M_{\max} / I_x) Y_{\text{наиб}} = M_{\max} / W_x \leq [\sigma],$$

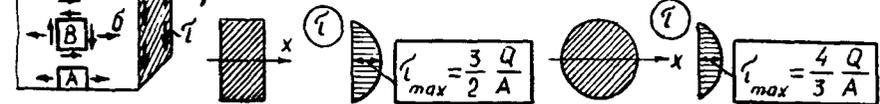
где $W_x = I_x / Y_{\text{наиб}}$ - осевой момент сопротивления.



Касательные напряжения

Формула Журавского

$$\tau = QS_x^{\text{отс}} / (bI_x)$$



Условие прочности

$$\tau_{\max} = kQ/A \leq [\tau],$$

где k - коэффициент формы, равный: 3/2 - для прямоугольника, 4/3 - для круга



Главные напряжения

$$\sigma_{1,3} = 0,5 \left[\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right]$$

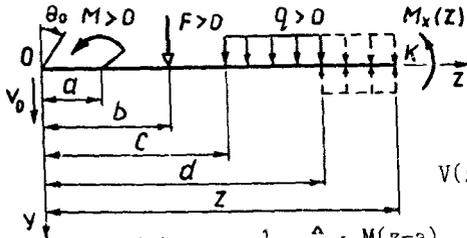
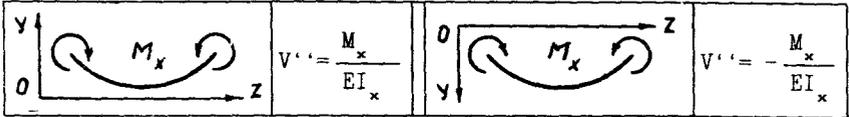
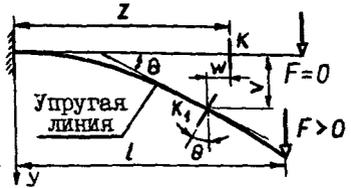


7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И РАСЧЕТ НА ЖЕСТКОСТЬ

- Перемещения:
- линейные $\left\{ \begin{array}{l} \text{прогиб } V, \\ \text{смещение } W \ll V; \end{array} \right.$
 - угловое (угол поворота) $\theta = dV/dz$.

Основное дифференциальное уравнение упругой линии балки

$$V'' = \pm \frac{M_x}{EI_x}$$



Метод начальных параметров

$$\theta(z) = \theta_0 - \frac{1}{EI_x} \int_0^z M_x dz$$

$$V(z) = V_0 + \theta_0 z - \frac{1}{EI_x} \int_0^z \left(\int_0^z M_x dz \right) dz$$

$$\theta(z) = \theta_0 + \frac{1}{EI_x} \sum \left[\frac{M(z-a)}{1!} + \frac{F(z-b)^2}{2!} + q \frac{(z-c)^3}{3!} - q \frac{(z-d)^3}{3!} \right]$$

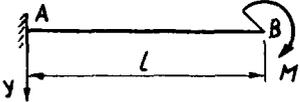
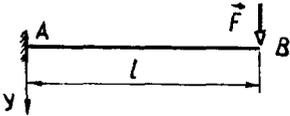
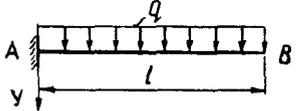
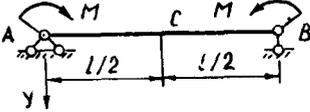
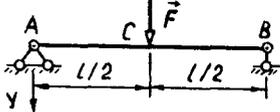
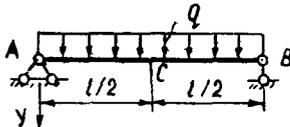
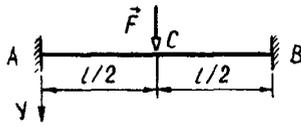
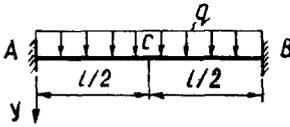
$$V(z) = V_0 + \theta_0 z + \frac{1}{EI_x} \sum \left[\frac{M(z-a)^2}{2!} + \frac{F(z-b)^3}{3!} + q \frac{(z-c)^4}{4!} - q \frac{(z-d)^4}{4!} \right]$$

Энергетический метод

Интеграл Мора	Правило Верещагина	Формула Симпсона
$EI_x v_k = \int_1 M_F M_d Z$	$I = \int_1 M_F M_d z = \omega_F c$	$I = \frac{1}{6} (M_A M_A + 4M_{cp} M_{cp} + M_B M_B)$

Фигура	Треугольник	Квадратная парабола		
omega	hl/2	hl/3	2hl/3	2hl/3

8. СИЛОВЫЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ БАЛОК

Схемы балок	Изгибающий момент	Прогиб	Угол поворота
	$M_x = -M = \text{const}$	$V_B = \frac{Ml^2}{2EI}$	$\theta_B = \frac{Ml}{EI}$
	$M_A = -Fl$	$V_B = \frac{Fl^3}{3EI}$	$\theta_B = \frac{Fl^2}{2EI}$
	$M_A = -ql^2/2$	$V_B = \frac{ql^4}{8EI}$	$\theta_B = \frac{ql^3}{6EI}$
	$M_x = M = \text{const}$	$V_c = \frac{Ml^2}{8EI}$	$\theta_A = \frac{Ml}{2EI}$
	$M_c = Fl/4$	$V_c = \frac{Fl^3}{48EI}$	$\theta_A = \frac{Fl^2}{16EI}$
	$M_c = ql^2/8$	$V_c = \frac{Fl^3}{192EI}$	$\theta_A = \theta_c = 0$
	$M_c = ql^2/8$	$V_c = \frac{Fl^3}{192EI}$	$\theta_A = \theta_c = 0$
	$M_A = -ql^2/12$ $M_c = ql^2/24$	$V_c = \frac{ql^4}{384EI}$	$\theta_A = \theta_c = 0$

9. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ СИСТЕМЫ

Конструкцию, усилия в которой не могут быть определены только при помощи уравнений статистики, называют статически неопределимой. С точки зрения расчета ее удобно рассматривать как некоторую статически определимую систему, именуемую в последующем основной системой, на которую наложены дополнительные связи.

Статически неопределимые системы (в отличие от статически определимых) обладают следующими особенностями:

1) распределение усилий в них зависит не только от внешних сил, но и от соотношения жесткостей отдельных элементов, а именно: чем больше жесткость элемента, тем больше усилие, на него приходится;

2) при смещении опор, неточном изготовлении элементов, колебаниях температуры возникают дополнительные усилия.

Одним из важнейших методов расчета статически неопределимых систем является метод сил, в котором за основные неизвестные принимают обобщенные реактивные силы в отброшенных дополнительных связях системы. Расчет ведется в такой последовательности.

1. Определяется степень статической неопределимости (по числу дополнительных связей).

2. Выбирается основная система, которая получается из заданной после удаления дополнительных связей. Действие отброшенных связей заменяется неизвестными силовыми факторами X_1, X_2, \dots, X_n .

3. Составляются канонические уравнения метода сил, математически выражающие условие эквивалентности основной и заданной систем:

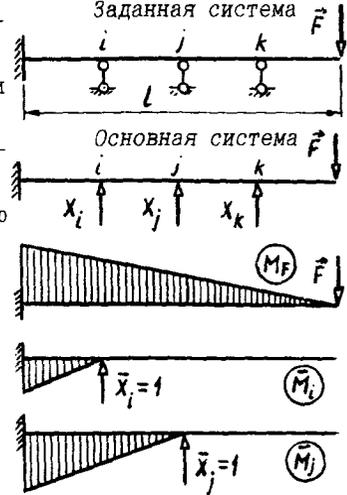
$$\sum_{j=1}^n \delta_{ij} X_j + \Delta_{iF} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где $EI \delta_{ij} = \int \bar{M}_i \bar{M}_j dz, \quad EI \Delta_{iF} = \int \bar{M}_i \bar{M}_F dz.$

Из решения этих уравнений находят значения X_1, X_2, \dots, X_n .

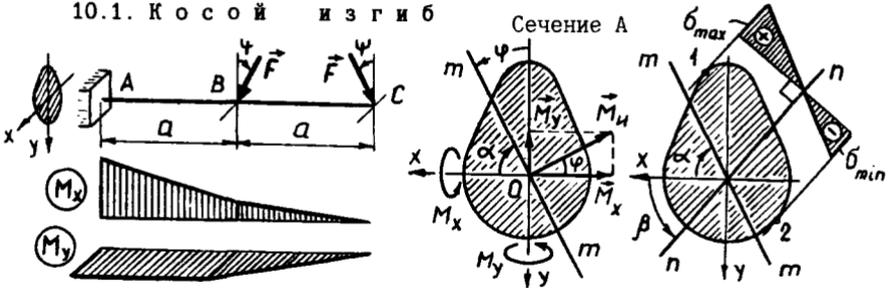
4. Строятся эпюры внутренних силовых факторов.

5. Выполняется проверка решения, включающая в себя статическую проверку (проверяется равновесие системы и ее отдельных частей) и кинематическую (проверяется отсутствие перемещений по направлению наложенных на систему связей).



10. СЛОЖНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

10.1. Косой изгиб



Уравнение силовой линии

$$y = k_1 x, \text{ где } k_1 = \operatorname{tg} \alpha.$$

Уравнение нейтральной линии $y_0 = k_2 x_0$, $k_2 = \operatorname{tg} \beta = -(1/k_1)(I_x/I_y)$.

Связь между угловыми коэффициентами

$$k_1 k_2 = -I_x/I_y$$

Распределение нормальных напряжений

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x$$

или $\sigma = M_n \left(\frac{\cos \varphi}{I_x} y + \frac{\sin \varphi}{I_y} x \right)$.

Условия прочности:

- для балок произвольного сечения из хрупких материалов

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = (M_x/I_x)y_1 + (M_y/I_y)x_1 \leq [\sigma_p], \\ \sigma_{\min} = (M_x/I_x)y_2 + (M_y/I_y)x_2 \leq [\sigma_c]; \end{cases}$$

- для балок прямоугольного сечения из пластичных материалов

$$\sigma_{\max} = M_x/W_x + M_y/W_y \leq [\sigma].$$

Полное перемещение $\bar{f} = \bar{u} + \bar{v}$,

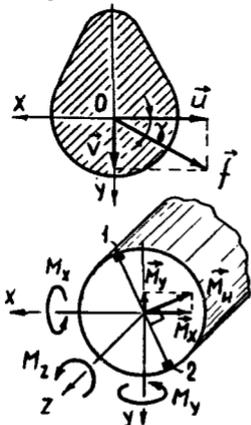
$$f = \sqrt{u^2 + v^2}, \operatorname{tg} \gamma = v/u.$$

Условие жесткости $f_{\max} \leq [f]$.

Примечание. При плоском косом изгибе $\bar{f} \perp n$.

10.2. Изгиб с кручением

10.2.1. Стержень круглого сечения

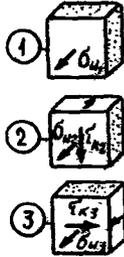
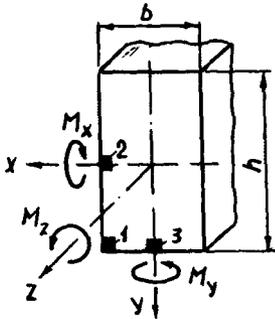


Условие прочности

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = M_{\text{ЭКВ}}/W_x \leq [\sigma]$$

$$M_{\text{ЭКВ}} = \begin{cases} \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} & \text{— по III гип. проч.,} \\ \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + 0,75M_z^2} & \text{— по IV гип. проч.} \end{cases}$$

10.2.2. Стержень прямоугольного сечения



$$\sigma_{ЭKB_1} = \sigma_{n_1} = M_x/W_x + M_y/W_y,$$

$$\sigma_{ЭKB_2} = \sqrt{\sigma_{n_2}^2 + 4\tau_{k_2}^2},$$

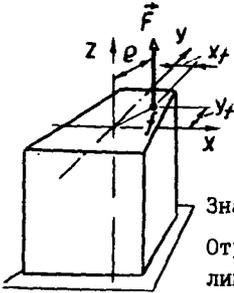
$$\sigma_{n_2} = M_y/W_y, \quad \tau_{k_2} = M_z/(8b^3),$$

$$\sigma_{ЭKB_3} = \sqrt{\sigma_{n_3}^2 + 4\tau_{k_3}^2},$$

$$\sigma_{n_3} = M_x/W_x, \quad \tau_{k_3} = \gamma\tau_{k_2}.$$

Условие прочности

$$\max \{ \sigma_{ЭKB_1}, \sigma_{ЭKB_2}, \sigma_{ЭKB_3} \} \leq [\sigma]$$



10.3. Внецентренное продольное нагружение
Распределение нормальных напряжений

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x}y + \frac{M_y}{I_y}x = \frac{F}{A} \left(1 + \frac{y_f y}{i_x^2} + \frac{x_f x}{i_y^2} \right).$$

Знак "плюс" соответствует растяжению, "минус" - сжатию.

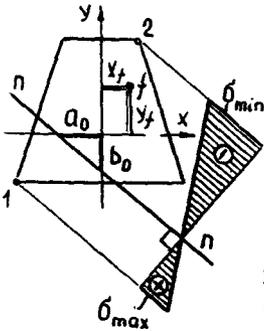
Отрезки, отсекаемые нейтральной линией на осях координат

$$\begin{cases} a_0 = -i_y^2/x_f, \\ b_0 = -i_x^2/y_f. \end{cases}$$

Внецентренное сжатие

Условия прочности

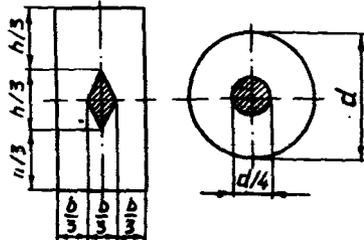
$$\begin{cases} \sigma_{\max} = -\frac{F}{A} \left(1 + \frac{y_f y_1}{i_x^2} + \frac{x_f x_1}{i_y^2} \right) \leq [\sigma_p], \\ \sigma_{\min} = \left| -\frac{F}{A} \left(1 + \frac{y_f y_2}{i_x^2} + \frac{x_f x_2}{i_y^2} \right) \right| \leq [\sigma_c]. \end{cases}$$



Ядро сечения

Координаты вершин

$$\begin{cases} x_{Я} = -i_y^2/a_0, \\ y_{Я} = -i_x^2/b_0. \end{cases}$$



11. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СИСТЕМ

11.1. Продольный изгиб

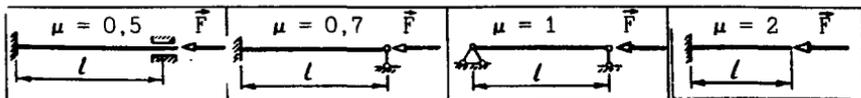
Формула Эйлера (стержни большой гибкости, для которых $\sigma_{кр} \leq \sigma_{пц}$)

$$F_{кр} = \pi^2 EI_{\min} / (\mu l)^2 \quad \text{или} \quad \sigma_{кр} = \pi^2 E / \lambda^2.$$

Формула Тетмайера-Ясинского (стержни средней гибкости, $\sigma_{кр} \geq \sigma_{пц}$)

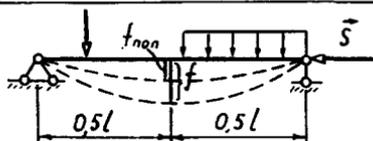
$$F_{кр} = A (a - b\lambda + c\lambda^2) \quad \text{или} \quad \sigma_{кр} = a - b\lambda + c\lambda^2$$

Гибкость стержня $\lambda = \mu l / i$, где μ - коэффициент приведения.



Условие устойчивости $n_y = F_{кр} / F \geq [n_y]$ или $F/A \leq \varphi[\sigma_c]$.

Внецентрированное нагружение	Учет начального искривления
$f = (4e/\pi) / (F_0/F - 1)$	$f = f_0 / (1 - F/F_0)$
$F_0 = \pi^2 EI / l^2$ - эйлера критическая сила	



11.2. Продольно-поперечный изгиб

Максимальный прогиб $f = f_{non} / (1 - S/S_0)$.

Максимальное напряжение

$$\sigma_{\max} = \frac{S}{A} + \frac{1}{W_x} (M_{non} + \frac{Sf_{non}}{1 - S/S_0}), \quad S_0 = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad \text{- эйлера критическая сила.}$$

Условие прочности $\sigma_{рас} = \frac{S}{A} + \frac{1}{W_x} (M_{non} + \frac{Sf_{non} [n]}{1 - [n]S/S_0}) \leq [\sigma]$.

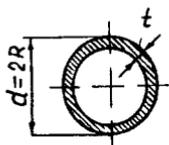
Условие жесткости $f \leq [f]$.

11.3. Устойчивость труб

Критическая нагрузка $p_{кр} = Et^3 / [4(1 - \nu^2)R^3]$.

Для стальных труб ($E=200$ ГПа, $\nu=0,3$) $p_{кр} = 55(20t/d)^3$ МПа.

Условие устойчивости $n_y = p_{кр} / p \geq [n_y]$.

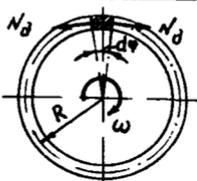


12. ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ

Общие зависимости

$$\sigma_{\partial} = k_{\partial} \sigma_{\text{ст}}, \quad \delta_{\partial} = k_{\partial} \delta_{\text{ст}}$$

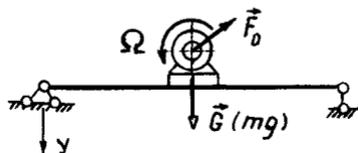
12.1. Учет сил инерции

 <p style="text-align: center;">Поступательное движение</p> $\sigma_{\partial} = k_{\partial} \sigma_{\text{ст}},$ $k_{\partial} = 1 + a/g, \quad \sigma_{\text{ст}} = G/A$	<p style="text-align: center;">Равномерно вращающееся тонкое кольцо</p>  $\sigma_{\partial} = \rho \omega^2 R^2 = \rho v^2$
--	--

12.2. Действие удара на конструкции

 <p style="text-align: center;">Продольный удар</p> $\Delta l_{\text{ст}} = G l / (E A)$ $k_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta l_{\text{ст}}}}$	 <p style="text-align: center;">Удар в канатах при заедании троса</p> $k_{\partial} = 1 + \frac{v_0}{\sqrt{g \Delta l_{\text{ст}}}}$	 <p style="text-align: center;">Поперечный удар</p> $k_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + 2h/f_{\text{ст}}}$
--	---	---

12.3. Колебания упругих систем с одной степенью свободы



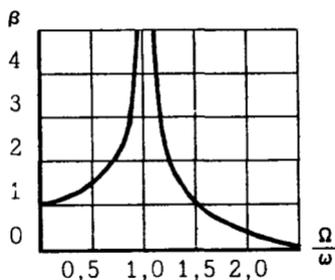
Уравнение колебаний упругой системы
(неустановившееся движение)

$$y = \underbrace{a \sin(\omega t + \varphi)}_{\text{собственные кол.}} + \underbrace{A \sin \Omega t}_{\text{вынужденные}},$$

(собственные кол.) (вынужденные)

происходящих под действием возмущающей силы $F_{\text{воз}} = F_0 \sin \Omega t$,

где F_0 — центробежная сила инерции неуравновешенных масс ротора.



Частота собственных колебаний упругой системы $\omega = \sqrt{c/m} = \sqrt{g/\delta_{\text{ст}}} = 1/\sqrt{m\delta_{11}}$

Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = (F_0/c)\beta,$$

$\beta = |1/[1 - (\Omega/\omega)^2]|$ — коэффициент нарастания колебаний.

Динамический коэффициент

$$k_{\partial} = 1 + (F_0/G)\beta.$$

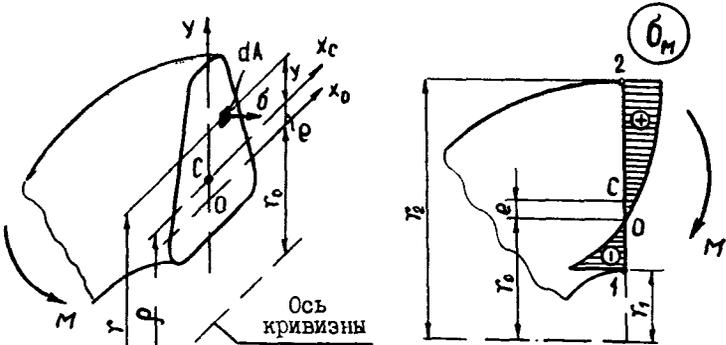
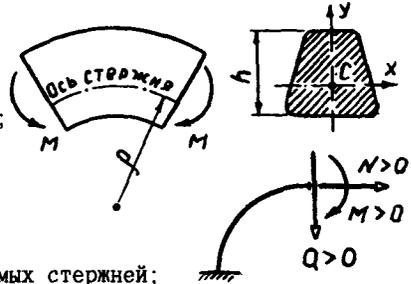
13. ПЛОСКИЕ КРИВЫЕ СТЕРЖНИ

Классификация стержней;

- малой кривизны $h/\rho < 1/5$;
- средней кривизны $1/5 \leq h/\rho \leq 1/2$;
- большой кривизны $h/\rho > 1/2$.

Правило знаков для внутренних силовых факторов:

- для N и Q такое же, как для прямых стержней;
- изгибающий момент считается положительным, если он увеличивает кривизну стержня (вызывает растяжение с выпуклой стороны).



Положение

нейтральной линии

$$r_0 = A / \left(\int \frac{dA}{r} \right)$$

Приближенная формула Н Н Давиденкова
(для стержней малой и средней кривизны)

$$e \approx I_{x_c} / (\rho A)$$

Закон распределения

нормальных напряжений $\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{N}{A} + \frac{M}{Ae} \left(1 - \frac{r_0}{r} \right)$

Условие прочности $\sigma_{рас} \leq [\sigma]$,

$$\sigma_{рас} = \max \{ \sigma_{рас_1}, \sigma_{рас_2} \}, \quad \begin{cases} \sigma_{рас_1} = |\sigma_N + \sigma_{N_1}| \\ \sigma_{рас_2} = |\sigma_N + \sigma_{N_2}| \end{cases}$$

$$\sigma_{N_1} = (M/Ae)(1 - r_0/r_1), \quad \sigma_{N_2} = (M/Ae)(1 - r_0/r_2)$$

Примечание Для сечений, симметричных относительно центральной оси X_c (прямоугольник, круг и т.п.), $\sigma_{рас_1} > \sigma_{рас_2}$, т.е. опасной является внутренняя точка (т. 1).

14. ПЕРЕМЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Параметры цикла:

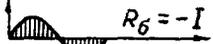
$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}, R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max},$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2,$$

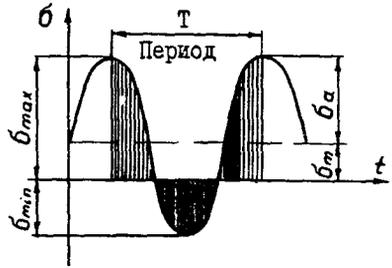
$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2.$$

Характерные циклы:

- симметричный



- пульсационный



σ_{\max}

Предел выносливости $\sigma_R(\tau_R)$ – наибольшее напряжение цикла, которое образец может выдержать, не разрушаясь, до базы испытания N_B , равной 10^7 циклов для стали и $(5 \dots 10) \cdot 10^7$ для цветных металлов

Эмпирические соотношения для $\sigma_R(\tau_R)$:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \dots 0,5) \sigma_{\text{ПЧ}}; \sigma_{-1\text{P}} \approx 0,75 \sigma_{-1}; \tau_{-1} \approx (0,6 \dots 0,8) \sigma_{-1}.$$

Факторы, влияющие на величину предела выносливости:

- 1) абсолютные размеры поперечного сечения (масштабный фактор) $K_{d\sigma} = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1}$;
- 2) концентрация напряжений $K_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_{-1K}$;
- 3) качество обработки поверхности $K_F = \sigma_{-1\text{П}} / \sigma_{-1}$;
- 4) поверхностное упрочнение $K_V = \sigma_{-1\text{Y}} / \sigma_{-1}$;
- 5) асимметрия цикла (коэффициенты чувствительности ψ_σ и ψ_τ);
- 6) эксплуатационные факторы (коррозия, температура и др.).

Коэффициент снижения предела выносливости

$$K = (K_\sigma / K_{d\sigma} + 1 / K_F - 1) / K_V.$$

Запас прочности определяется:

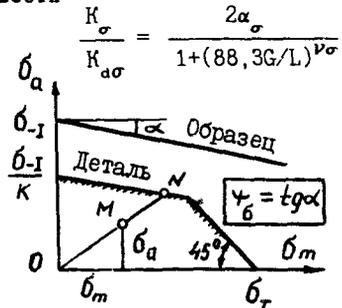
- по формуле Серенсена-Кинасшвили при простых видах деформации

$$n_\sigma = ON / OM = \sigma_{-1} / (K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m),$$

$$n_\tau = \tau_{-1} / (K_\tau \tau_m);$$

- по формуле Гафа и Полларда при плоском напряженном состоянии

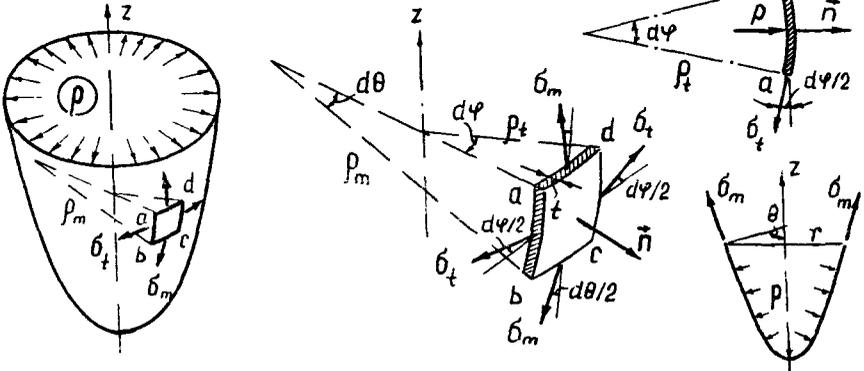
$$n_R = n_\sigma n_\tau / \sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}$$



15. ТОНКОСТЕННЫЕ СОСУДЫ

Исходные допущения:

- сосуды имеют форму тела вращения без резких переходов и изломов с тонкой стенкой ($t/d \leq 1/20$);
- нагрузка является осесимметричной



Разрешающие уравнения для определения меридионального σ_m и окружного σ_t напряжений:

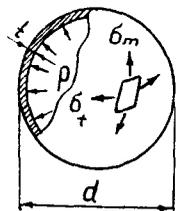
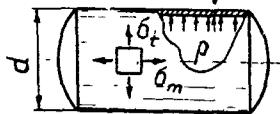
- уравнение Лапласа

(получается из уравнения равновесия элемента abcd в проекции на нормаль \bar{n})

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{t}$$

- уравнение равновесия части сосуда, отсеченной нормальным ко ническим сечением, в проекции на ось сосуда z

$$\sigma_m 2\pi r t \sin\theta = p\pi r^2.$$

Сферический сосуд	Цилиндрический сосуд
	
$\sigma_m = \sigma_t = pd/4t$ $\sigma_r = 0$ $\sigma_{\text{ЭКВ}_{III}} = pd/4t$	$\sigma_m = pg/4t$ $\sigma_r = 0$ $\sigma_t = pd/2t$ $\sigma_{\text{ЭКВ}_{III}} = pd/2t$

Условие прочности $\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma]$

16. ТОЛСТОСТЕННЫЕ ТРУБЫ

Допущение: нагрузка осесимметрична и постоянна вдоль оси

Основные уравнения

- уравнение равновесия

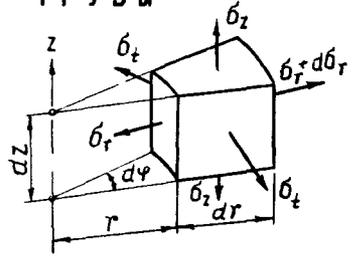
$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r) - \sigma_t = 0,$$

- геометрические $\epsilon_r = du/dr$, $\epsilon_t = u/r$,

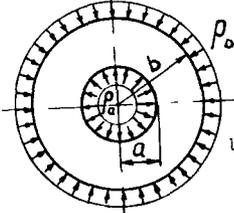
- физические (закон Гука)

$$\begin{cases} \epsilon_r = [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)]/E, \\ \epsilon_t = [\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z)]/E \end{cases}$$

Разрешающие уравнения $\sigma_{r,t} = A \mp B/r^2$, где A и B - произвольные постоянные, опеределаемые из граничных условий задачи

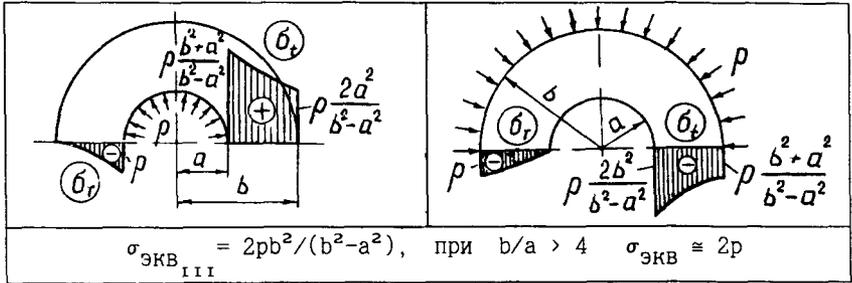


16.1 Труба нагружена внутренним и внешним давлением (задача Ламе)

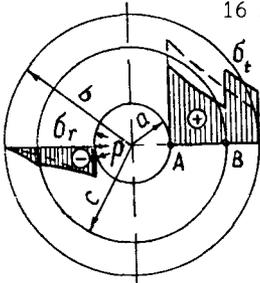


$$\sigma_{r,t} = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} \mp \frac{a^2 b^2}{r} \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2},$$

$$u = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{a^2 b^2}{r} \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2} - \frac{\nu}{E} \sigma_z r$$



16.2 Составные соединенные с натягом цилиндры



Контактное давление $p_k = \frac{E\Delta}{2c^3} \frac{(c^2 - a^2)(b^2 - c^2)}{b^2 - a^2}$

Оптимальный натяг из условия равнопрочности цилиндров ($\sigma_{\text{ЭКВ}A} = \sigma_{\text{ЭКВ}B}$)

$$\Delta = \frac{2p}{E} \frac{cb^2(c^2 - a^2)}{b^2(c^2 - a^2) + c^2(b^2 - c^2)}$$

Условия Гадоллина:

$$c = \sqrt{ab}, \quad \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{min}} = pb/(b - a)$$

17. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

Принятые условные обозначения

- B_1 - безразмерный коэффициент,
 b_1 - длины хорд отверстий в днищах, мм ($i=1,2,3 \dots n$).
 c - сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм
 c_1 - прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм,
 c_2 - прибавка для компенсации минусового допуска, мм,
 c_3 - технологическая прибавка, мм.
 D - внутренний диаметр аппарата, мм,
 D_1 - наружный диаметр аппарата, мм,
 D_2 - наименьший диаметр наружной утоненной части крышки, мм,
 D_3 - диаметр болтовой окружности, мм,
 D_E - эффективный диаметр конич обечайки при внешнем давлении, мм
 D^P - расчетный диаметр днища (крышки), мм (см прилож 11, табл 2)
 D_{CP} - средний диаметр прокладки, мм,
 d - диаметр отверстия в днище или крышке, мм,
 E - модуль продольной упругости материала аппарата при расчетной температуре, МПа (см приложение 11, табл 7).
 F - расчетное осевое растягивающее или сжимающее усилие (без учета нагрузки, возникающей от внутреннего избыточного или наружного давления), Н,
 F_0 - равнодействующая внутреннего давления, Н,
 F_6 - нагрузка на болты крепления крышки, Н,
 $F_{пр}$ - реакция прокладки, Н,
 H - высота выпуклой части днища по внутренней поверхности, мм,
 K - коэффициент конструкции плоских днищ и крышек (см приложение 11, табл 2),
 K_0 - коэффициент ослабления плоских днищ (крышек) отверстием,
 K_1, K_2, K_3 - безразмерные коэффициенты (см приложение 11, рис 41,42).
 K_3 - коэффициент приведения радиуса кривизны эллиптического днища (см приложение 11, рис 43),
 l - расчетная длина гладкой обечайки, мм.
 l_1 - длина примыкающего к обечайке элемента, мм,
 l_E - эффективная длина конической обечайки, мм,
 $l_{пр}$ - приведенная расчетная длина, мм (см приложение 11, табл 1).
 M - расчетный изгибающий момент, Н·мм,
 n_y - коэффициент запаса устойчивости (для рабочих условий $n_y=2,4$, для условий испытаний и монтажа $n_y=1,8$);

- p - внутреннее избыточное или наружное давление, МПа,
 Q - расчетное поперечное усилие, Н,
 R - радиус кривизны в вершине дна по внутренней поверхности, мм,
 r - внутренний радиус отбортовки конической обечайки (дна), мм,
 s - исполнительная толщина стенки обечайки, мм,
 s_p - расчетная толщина стенки обечайки, мм,
 s_k - исполнительная толщина стенки конической обечайки, мм,
 s_{kp} - расчетная толщина стенки конической обечайки, мм,
 s_1 - исполнительная толщина стенки дна (крышки), мм,
 s_{1p} - расчетная толщина стенки дна (крышки), мм,
 s_2 - толщина плоской круглой крышки в месте уплотнения, мм,
 s_3 - толщина края крышки вне уплотнения, мм,
 s_n - толщина перегородки, мм,
 α - половина угла раствора при вершине конической обечайки, град.,
 β_1, β_2 - коэффициенты формы (см приложение 11, рис 44 и 45),
 $[\sigma]$ - допускаемое напряжение материала аппарата при расчетной температуре, МПа (см приложение 11, табл 3, 4, 5 и 6),
 φ - коэффициент прочности сварных швов (см прилож 11, табл 8)

17 1 Гладкие цилиндрические обечайки

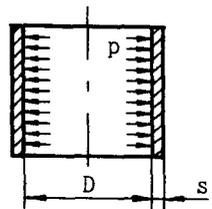
Исполнительная толщина стенки $s \geq s_p + c$,

где $c = c_1 + c_2 + c_3$

Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

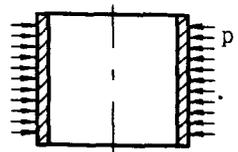
Расчетная
толщина стенки $s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi - p}$

Допускаемое внутреннее
избыточное давление $[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(s-c)}{D + (s-c)}$



Обечайки, нагруженные наружным давлением

Расчетная
толщина стенки $s_p \approx \max \left\{ K_2 D 10^{-2}, \frac{1,1pD}{2[\sigma]} \right\}$,
 где $K_2 = \frac{100(s-c)}{D}$ Коэффициент K_2 определяет-



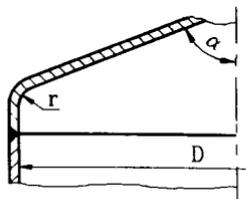
ся по номограмме на рис 41 в
приложении 11 в зависимости от
коэффициентов K_1 и K_3 , равных

$$K_1 = \frac{n_y}{2,4} \frac{p}{10^{-6}E}, \quad K_3 = \frac{1}{D}$$

При определении расчетной длины обечайки l_1 длину примыкающего элемента l_1 следует определять по формулам:

$$l_1 = \frac{H}{3} \quad \text{— для выпуклых днищ;}$$

$$l_1 = \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha} \quad \text{— для конических обечаек (днищ) без отбортовки, но не более длины конического элемента;}$$



$$l_1 = \max \left(r \sin \alpha; \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha} \right) \quad \text{— для конических обечаек (днищ) с отбортовкой, но не более длины конического элемента.}$$

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\epsilon}} \right)^2}},$$

где допускаемые давления:

$$\text{из условия прочности} \quad [p]_{\pi} = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)};$$

$$\text{из условия устойчивости в пределах упругости} \quad [p]_{\epsilon} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5},$$

$$\text{где } B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right\}.$$

Обечайки, нагруженные осевым растягивающим усилием

Расчетная
толщина стенки

$$s_p = \frac{F}{\pi D [\sigma] \varphi}$$



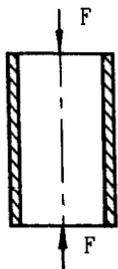
Допускаемое осевое
растягивающее усилие

$$[F] = \pi(D+s-c)(s-c)[\sigma] \varphi$$

Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое
сжимающее усилие

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{\epsilon}} \right)^2}},$$



где допускаемые осевые сжимающие усилия:

$$\text{из условия прочности} \quad [F]_{\pi} = \pi(D+s-c)(s-c)[\sigma],$$

из условия устойчивости
в пределах упругости

$$[F]_E = \begin{cases} \min \{ [F]_{E_1}; [F]_{E_2} \} & \text{при } \frac{l}{D} \geq 10, \\ [F]_{E_1} & \text{при } \frac{l}{D} < 10, \end{cases}$$

где $[F]_{E_1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5}$,

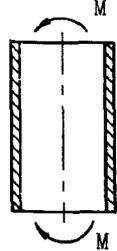
$$[F]_{E_2} = \frac{\pi(D+s-c)(s-c)E}{n_y} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2, \quad \text{гибкость } \lambda = \frac{2,83 \cdot l_{\text{пр}}}{D+s-c}.$$

Приведенная расчетная длина $l_{\text{пр}}$ дана в приложении 11.

Обечайки, нагруженные изгибающим моментом

Допускаемый
изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_E} \right)^2}},$$



где допускаемые изгибающие моменты:

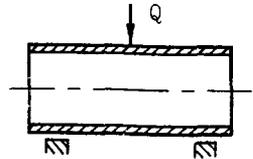
из условия прочности $[M]_{\text{п}} = \frac{\pi}{4} D(D+s-c)(s-c)[\sigma] = \frac{D}{4} [F]_{\text{п}}$,

из условия устойчивости
в пределах упругости $[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{D}{3,5} [F]_{E_1}$

Обечайки, нагруженные поперечными усилиями

Допускаемое
поперечное усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{п}}}{[Q]_E} \right)^2}},$$



где допускаемые поперечные усилия:

из условия прочности $[Q]_{\text{п}} = \frac{\pi}{4} D(s-c)[\sigma]$,

из условия устойчивости
в пределах упругости $[Q]_E = \frac{2,4E(s-c)^2}{n_y} \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s-c)}{l^2} \right]$.

Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия

Проверка на устойчивость $\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1,0$.

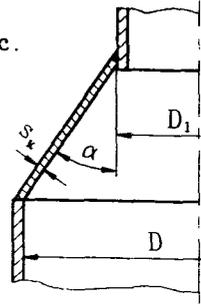
17.2. Гладкие конические обечайки

Исполнительная толщина стенки $s_k = s_{k.p} + c$.

Конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетная толщина стенки $s_{k.p} = \frac{pD}{2\varphi[\sigma] - p} \frac{1}{\cos\alpha}$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[p] = \frac{2[\sigma](s_k - c)}{\frac{D}{\cos\alpha} + (s_k - c)}$.



Конические обечайки, нагруженные наружным давлением

Расчетные формулы применимы при условии $\alpha \leq 70^\circ$.

Расчетная толщина стенки в первом приближении $s_{k.p} \approx \max \left\{ K_2 D \cdot 10^{-2}; \frac{1,1pD}{2[\sigma]} \right\}$.

Коэффициент K_2 определяется по номограмме (приложение 11, рис. 41,

42) в зависимости от коэффициентов $K_1 = \frac{n_y}{2,4} \frac{p}{10^{-6}E}$ и $K_3 = \frac{1}{D}$.

Далее полученное значение толщины проверяется на допускаемое наружное давление.

Допускаемое наружное давление $[p] = \frac{[p]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{II}}{[p]_E} \right)^2}}$,

где допускаемые давления:
из условия прочности

$$[p]_{II} = \frac{2[\sigma](s_k - c)}{\frac{D}{\cos\alpha} + (s_k - c)}$$

из условия устойчивости
в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6}E}{n_y B_1} \frac{D_E}{l_E} \left[\frac{100(s_k - c)}{D_E} \right]^{2,5}$$

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_E}{l_E} \sqrt{\frac{D_E}{100(s_k - c)}} \right\},$$

где эффективные размеры конической обечайки определяют по формулам

$$l_E = \frac{D - D_1}{2\sin\alpha};$$

$$D_E = \max \left\{ \frac{D + D_1}{2\cos\alpha}; \frac{D}{\cos\alpha} - 0,31(D - D_1) \sqrt{\frac{D + D_1}{s_k - c} \operatorname{tg}\alpha} \right\}.$$

17.3. Выпуклые днища

Исполнительная толщина стенки $s_1 \approx s_{1p} + c$.

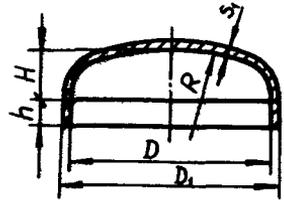
Стандартные эллиптические днища ($H=0,25D$), нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетная
толщина стенки

$$s_{1p} = \frac{pD}{2\varphi[\sigma] - 0,5p}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{D + 0,5(s_1 - c)}$$



Стандартные эллиптические днища ($H=0,25D$), нагруженные наружным давлением

$$s_{1p} = \max \left\{ \frac{K_3 D}{510} \sqrt{\frac{n_y p}{10^{-6} E}}; \frac{pD}{2[\sigma]} \right\}$$

Для предварительного расчета принимают $K_3 = 0,9$.

$$\text{Допускаемое наружное давление} \quad [p] = \frac{[p]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{II}}{[p]_E} \right)^2}}$$

где допускаемые давления:

$$\text{из условия прочности} \quad [p]_{II} = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{D + 0,5(s_1 - c)}$$

$$\text{из условия устойчивости в пределах упругости} \quad [p]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[\frac{100(s_1 - c)}{K_3 D} \right]^2$$

Коэффициент K_3 определяют по рис. 43 в приложении 11 или по формуле

$$K_3 = \frac{1 + (2,4 + 8x)x}{1 + (3,0 + 10x)x}, \quad \text{где } x = 10 \frac{s_1 - c}{D} \left(\frac{D}{2H} - \frac{2H}{D} \right)$$

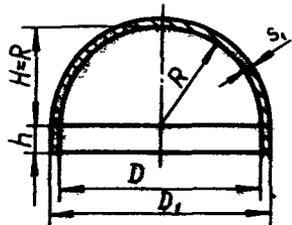
Полусферические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетная
толщина стенки

$$s_{1p} = \frac{pD}{4\varphi[\sigma] - p}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{4(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{D + (s_1 - c)}$$



Полусферические днища, нагруженные наружным давлением

$$\text{Расчетная толщина стенки} \quad s_{1p} = \max \left\{ \frac{D}{1020} \sqrt{\frac{n_y p}{10^{-6} E}}; \frac{pD}{4[\sigma]} \right\}$$

Допускаемое наружное давление $[p]$ определяется как для эллиптического днища, при этом допускаемые давления:

$$\text{из условия прочности} \quad [p]_{\text{п}} = \frac{4[\sigma](s_1 - c)}{D + (s_1 - c)},$$

$$\text{из условия устойчивости} \\ \text{в пределах упругости} \quad [p]_{\text{Е}} = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[\frac{200(s_1 - c)}{D} \right]^2.$$

Торосферические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением

$$\text{Расчетная толщина} \\ \text{стенки в краевой зоне} \quad s_{1p} = \frac{pD_1 \beta_1}{2\phi[\sigma]},$$

для сварных днищ дополнительная проверка толщины стенки в центральной зоне

$$s_{1p} = \frac{pR}{2\phi[\sigma] - 0,5p},$$

где D_1 - наружный диаметр, R - радиус кривизны в вершине днища.

Допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны

$$[p]_1 = \frac{2(s_1 - c)\phi[\sigma]}{D_1 \beta_2},$$

для сварных днищ дополнительная проверка из условия прочности центральной зоны

$$[p]_2 = \frac{2(s_1 - c)\phi[\sigma]}{R + 0,5(s_1 - c)},$$

$$[p] = [p]_1, \quad \text{для сварных днищ} \quad [p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \}.$$

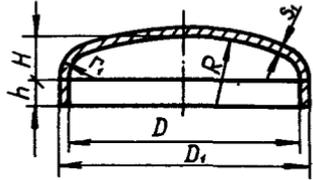
Торосферические днища, нагруженные наружным давлением

$$\text{Расчетная толщина стенки} \quad s_{1p} = \max \left\{ \frac{R}{510} \sqrt{\frac{n_y p}{10^{-6} E}}; \frac{pR}{2[\sigma]} \right\}.$$

Допускаемое наружное давление $[p]$ определяется как для эллиптического днища, при этом допускаемые давления:

$$\text{из условия прочности} \quad [p]_{\text{п}} = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{R + 0,5(s_1 - c)},$$

$$\text{из условия устойчивости} \\ \text{в пределах упругости} \quad [p]_{\text{Е}} = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[\frac{100(s_1 - c)}{R} \right]^2.$$



17.4. Плоские круглые днища и крышки

Условие применимости расчетных формул $\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0,11$

Расчетная толщина круглых днищ и крышек, нагруженных внутренним избыточным или наружным давлением

$$s_{1p} = K K_o D_p \sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}}$$

Значение коэффициента K в зависимости от конструкции днищ и крышек определяют по табл 2 в приложении 11

Коэффициент ослабления K_o для днищ и крышек

без отверстий

$$K_o = 1,0,$$

имеющих одно отверстие

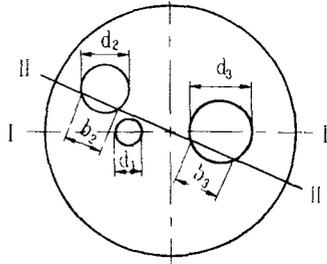
$$K_o = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2};$$

имеющих несколько отверстий

$$K_o = \sqrt{1 - \Sigma \left(\frac{d_i}{D_p}\right)^3} / \sqrt{1 - \Sigma \left(\frac{d_i}{D_p}\right)}$$

Коэффициент ослабления K_o определяют для наиболее ослабленного сечения. Максимальную сумму для длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении днища или крышки определяют согласно рисунку по формуле

$$\Sigma d_i = \max \{(d_1 + d_3); (b_2 + b_3)\}$$



Во всех случаях присоединения днища к обечайке минимальная толщина плоского круглого днища должна быть больше или равна толщине обечайки, рассчитанной в соответствии с п 17 1.

Допускаемое давление $[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K \cdot K_o \cdot D_p}\right)^2 [\sigma] \varphi$

Толщину s_2 для типов соединения 10, 11 и 12 (см. приложение 11, табл 2) определяют по формуле

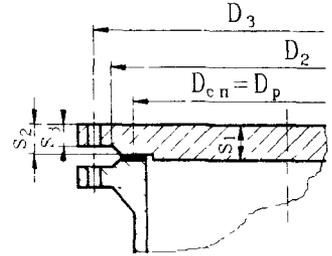
$$s_2 \geq \begin{cases} \max \left\{ 1,1s_1; \frac{s_1}{1 + \frac{D-2r}{1,2s_1} \sin \gamma} \right\} & \text{для типа 10,} \\ \max \left\{ 0,5D_p \frac{p}{[\sigma]} + c; s_1 \sqrt{2 \frac{D_p - D_2}{D_p}} \right\} & \text{для типов 11, 12} \end{cases}$$

Плоские круглые крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные внутренним избыточным давлением

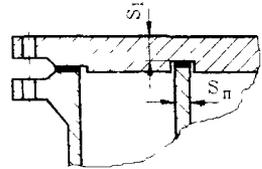
Расчетная толщина стенки $s_{1p} = K_0 K_4 D_p \sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}}$,

где $K_4 = 0,41 \sqrt{\frac{1 + 3\psi \left(\frac{D_3}{D_{c.п}} - 1 \right)}{D_3 / D_{c.п}}}$,

$\psi = 1 + \frac{F_{пp}}{F_0}$ или $\psi = \frac{F_6}{F_0}$, $F_0 = 0,785pD_{c.п}^2$.



Для крышки, имеющей паз для перегородки (например, камер теплообменника), значение коэффициента K_4 для определения толщины в месте паза рассчитывают с учетом усилия от сжатия прокладки в пазах по формуле



$$K_4 = 0,41 \sqrt{\frac{1 + 3\psi \left(\frac{D_3}{D_{c.п}} - 1 \right) + 9,6 \frac{D_3}{D_{c.п}} \frac{s_{п}}{D_{c.п}}}{\frac{D_3}{D_{c.п}}}}$$

Толщина в месте уплотнения $s_2 \geq \max \left\{ K_5 \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_1} \Phi \right\} + c$,

где $K_5 = 0,8 \sqrt{\frac{D_3}{D_{c.п}} - 1}$, $\Phi = \max \left\{ \frac{F_{6p}}{[\sigma]_p}; \frac{F_{6м}}{[\sigma]_м} \right\}$.

В последней формуле индекс p указывает на то, что величина относится к рабочему состоянию или испытаниям, м - состояние монтажа

Толщина края плоской круглой крышки вне зоны уплотнения

$$s_3 \geq \max \left\{ K_6 \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_1} \Phi \right\} + c, \text{ где } K_6 = 0,8 \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1}.$$

Допускаемое давление $[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 K_4 D_p} \right)^2 [\sigma] \varphi$.

ПРИЛОЖЕНИЯ
СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

НОВЫЙ СТАНДАРТ И С О
"Обозначения и основные символы"

На основе сложившихся в мировой практике традиций стандартом N 3898 для обозначения отдельных понятий расчета конструкций предусматривается использование латинских и греческих букв, цифр и некоторых специальных обозначений. В табл. 1 - 3 приведены основные символы, а в табл. 4, 5 - индексы.

Т а б л и ц а 1

Буква	З н а ч е н и е
A	Площадь
D	Жесткость пластинок и оболочек при изгибе (цилиндрическая жесткость)
E	Модуль продольной упругости (модуль Юнга)
F	Сосредоточенная сила; воздействие вообще
G	Модуль упругости при сдвиге; постоянная нагрузка (вес)
H	Горизонтальная составляющая силы
I	Момент инерции плоской фигуры
L	Может быть использована для обозначения пролета, длины элемента и т.п.
M	Момент вообще; изгибающий момент
N	Нормальное усилие
P	Мощность
Q	Поперечная сила
R	Результирующая сила; реакция опоры
S	Статический момент плоской фигуры
T	Крутящий момент; температура
V	Объем; вертикальная составляющая силы
W	Момент сопротивления
X, Y, Z	Составляющие силы, параллельные осям x, y, z

Т а б л и ц а 2

Буква	З н а ч е н и е
a	Расстояние; ускорение
b	Ширина
d	Диаметр
e	Эксцентриситет
f	Сопротивление
g	Ускорение силы тяжести
h	Высота, толщина
i	Радиус инерции
k	Коэффициент
l	Пролет, длина элемента
m	Масса; среднее значение
n	Количество чего-либо
q	Интенсивность погонной нагрузки
r	Радиус
s	Расстояние, шаг; стандартное отклонение
t	Время вообще; толщина тонкостенных элементов
x, y, z	Координаты

Т а б л и ц а 3

Буква	З н а ч е н и е
альфа α	Угол; отношение
бэ́та β	Угол; отношение
гамма γ	Объемный вес; относительный сдвиг; коэффициент надежности
дельта δ	Коэффициент изменчивости
эпсилон ϵ	Относительная деформация
кси ξ	Относительная координата x/l
эта η	Относительная координата y/l
дзета ζ	Относительная координата z/l
тэ́та θ	Поворот, вращение

Продолжение табл. 3

Буква	Значение
лямбда λ	Гибкость
мю μ	Коэффициент трения; коэффициент приведения
ню ν	Коэффициент Пуассона
ро ρ	Плотность
сигма σ	Нормальное напряжение
тау τ	Касательное напряжение

Таблица 4

Буква	Значение
с	Сжатие вообще (англ. и франц. compression)
d	Расчетное (англ. design)
e(eł)	Упругий (англ. elastic)
f	Трение (англ. friction, франц. frottement)
h	Горизонтальное (англ. horizontal)
i	Начальное (англ. и франц. initial)
k	Характеристическое (нормативное)
l	Продольное (англ. и франц. longitudinal)
m	Среднее значение (англ. mean, франц. moyen)
n	Нетто (net в случае опасности путаницы)
o	Нулевое начальное
t	Растяжение вообще (англ. tension, франц. traction)
	Поперечное (англ. и франц. transversal)
u	Предельное (англ. ultimate)
v	Вертикальное (англ. vertical)
y	Текучесть (англ. yield)

Т а б л и ц а 5

Сокращение	З н а ч е н и е
abc	Абсолютное (англ absolute)
adm	Допускаемое (англ admissible)
cal	Вычисленное (англ calculated)
crit (cr)	Критическое (англ critical)
ef	Эффективное (англ effective)
el (e)	Упругое (англ elastic)
est	Оцениваемое, ожидаемое (англ estimated)
exs	Особое, исключительное (англ exeptional)
ext	Внешнее, наружное (англ external)
inf	Нижнее (франц inferieur)
int	Внутреннее (англ internal)
lat	Боковое, из плоскости (англ lateral)
lim	Предельное (англ limit)
max	Максимальное (англ maximum)
min	Минимальное (англ minimum)
nom	Номинальное (англ nominal)
obs	Наблюдаемое, экспериментальное (англ observed)
pl	Пластическое (англ plastic)
red	Приведенное (англ reduced)
rel	Относительное (англ relative)
ser	Пригодность к эксплуатации (англ service)
sup	Верхнее (франц superieur)
tot	Полное, суммарное, общее (англ total)
var	Переменное (англ variable)

**Изменения обозначений основных величин,
применяемых в курсе сопротивления материалов,
в соответствии с рекомендациями И С О**

В е л и ч и н а		Н а и м е н о в а н и е	Примечание
Обозначение			
Старое	Новое		
A	W	Работа	work - работа
F	A	Площадь	area - площадь
N	P	Мощность	power - мощность
P	F	Сила	force - сила
$M_k = M_z$	T (M_t)	Крутящий момент	torque - крутящий момент
$q_z (q)$	p_e	Внешняя распределенная прод. нагрузка	external - внешний
μ	ν	Коэффициент Пуассона	-
δ	t	Толщина тонкостенных элементов	-

Остальные символы не изменились, однако вместо русских индексов используются латинские, соответствующие первым нескольким буквам аналогичного по смыслу английского слова.

1 Прочностные характеристики материала:

- предел пропорциональности $\sigma_{пц} - \sigma_{pr}$ (proportionality - пропорциональность)
- предел упругости $\sigma_y - \sigma_e$ (elasticity - упругость)
- предел текучести $\sigma_T - \sigma_Y$ (yield - текучесть)
- предел прочности $\sigma_B = \sigma_{пч} - \sigma_{ц}$ (ultimate - предельный)
 - а) при растяжении $\sigma_{вр} = \sigma_{пчр} - \sigma_{цт}$ (tension - растяжение)
 - б) при сжатии $\sigma_{вс} = \sigma_{пчс} - \sigma_{цс}$ (compression - сжатие)

2. Характерные напряжения:

- статическое $\sigma_{ст}$ - σ_{st} (statical - статический)
- динамическое $\sigma_{д}$ - σ_{d} (dynamic - динамический)
- контактное $\sigma_{к}$ - σ_{con} (contact - контакт)
- критическое $\sigma_{кр}$ - σ_{cr} (critical - критический)
- приведенное $\sigma_{пр} = \sigma_{экр}$ - σ_{red} (reduced - приведенный)
(эквивалентное)

3. Характерные деформации:

- поперечная $\epsilon_{поп} = \epsilon'$ - ϵ_t (transverse - поперечный)
- упругая $\epsilon_{упр}$ - ϵ_{el} (elastic - упругий)
- остаточная $\epsilon_{ост}$ - ϵ_r (residual - остаточный)

4. Допускаемое значение данной величины обозначается не с помощью квадратных скобок [...], а индексом adm (admissible - допускаемое):

- допускаемое напряжение [σ] - σ_{adm} ;
- допускаемая нагрузка [F] - F_{adm} ;
- допустимый прогиб [f] - v_{adm} ;
- нормативный коэффициент запаса прочности [n] - n_{adm} .

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

НОРМАЛЬНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ
по ГОСТ 6636, мм

Ra40 1, 1,05, 1,1, 1,15, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2, 2,1, 2,2, 2,4, 2,5, 2,6, 2,8, 3, 3,2, 3,4, 3,6, 3,8, 4, 4,2, 4,5, 4,8, 5, 5,2, 5,5, 6, 6,3, 6,5, 7, 7,5, 8, 8,5, 9, 9,5, 10, 10,5, 11, 11,5, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 50, 52, 55, 60, 63, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 240, 250

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Кратные и дольные единицы системы С И

Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель
Тера	Т	10^{12}	Деци	д	10^{-1}
Гига	Г	10^9	Санتي	с	10^{-2}
Мега	М	10^6	Милли	м	10^{-3}
Кило	к	10^3	Микро	мк	10^{-6}
Гекто	г	10^2	Нано	н	10^{-9}

СОРТАМЕНТ ПРОКАТНОЙ СТАЛИ

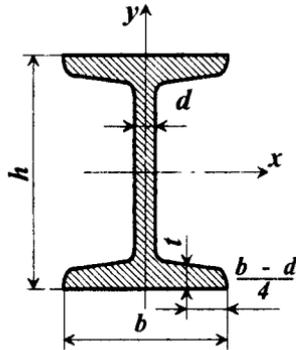


Таблица 1

Сталь горячекатанная
Балки двутавровые
ГОСТ 8239 - 72

Номер балки	Размеры, мм				Площадь сечения A , см^2	Масса 1м , кг	Справочные величины для осей						
							x - x				y - y		
	h	b	d	t			I_x , см^4	W_{x1} , см^3	i_x , см	S_x , см^3	I_y , см^4	W_{y1} , см^3	i_y , см
10	100	55	4,5	7,2	12,0	9,46	198	39,7	4,0	23,0	17,9	6,49	1,22
12	120	64	4,8	7,3	14,7	11,50	350	58,4	4,8	33,7	27,9	8,72	1,38
14	140	73	4,9	7,5	17,4	13,70	572	81,7	5,7	46,8	41,9	11,50	1,55
16	160	81	5,0	7,8	20,2	15,90	873	109,0	6,5	62,3	58,6	14,50	1,70
18	180	90	5,1	8,1	23,4	18,40	1290	143,0	7,4	81,4	82,6	18,40	1,88
18a	180	100	5,1	8,3	25,4	19,90	1430	159,0	7,5	89,8	114,0	22,80	2,12

Номер балки	Размеры, мм				Площадь сечения А, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей						
							х - х				у - у		
	h	b	d	t			I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	S _x , см ³	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см
20	200	100	5,2	8,4	26,8	21,00	1840	184,0	8,2	104,0	115,0	23,10	2,07
20a	200	110	5,2	8,6	28,9	22,70	2030	203,0	8,3	114,0	155,0	28,20	2,32
22	220	110	5,4	8,7	30,6	24,00	2550	232,0	9,1	131,0	157,0	28,60	2,27
22a	220	120	5,4	8,9	32,8	25,80	2790	254,0	9,2	143,0	206,0	34,30	2,50
24	240	115	5,6	9,5	34,8	27,30	3460	289,0	9,9	163,0	198,0	34,50	2,37
24a	240	125	5,6	9,8	37,5	29,40	3800	317,0	10,1	178,0	260,0	41,60	2,63
27	270	125	6,0	9,8	40,2	31,50	5010	371,0	11,2	210,0	260,0	41,50	2,54
27a	270	135	6,0	10,2	43,2	33,90	5500	407,0	11,3	229,0	337,0	50,00	2,80
30	300	135	6,5	10,2	46,5	36,50	7080	472,0	12,3	268,0	337,0	49,90	2,69
30a	300	145	6,5	10,7	49,5	39,20	7780	518,0	12,5	292,0	436,0	60,10	2,95
33	330	140	7,0	11,2	53,8	42,20	9840	597,0	13,5	339,0	419,0	59,90	2,79
36	360	145	7,5	12,3	61,9	48,60	13380	743,0	14,7	423,0	516,0	71,10	2,89
40	400	155	8,3	13,0	72,6	57,00	19062	953,0	16,2	545,0	667,0	86,10	3,03
45	450	160	9,0	14,2	84,7	66,50	27696	1231,0	18,10	708,0	808,0	101,00	3,09
50	500	170	10,0	15,2	100,0	78,50	39727	1589,0	19,90	919,0	1043,0	123,00	3,23
55	550	180	11,0	16,5	118,0	92,60	55962	2035,0	21,80	1181,0	1356,0	151,00	3,39
60	600	190	12,0	17,8	138,0	108,00	76806	2560,0	23,60	1491,0	1725,0	182,00	3,54

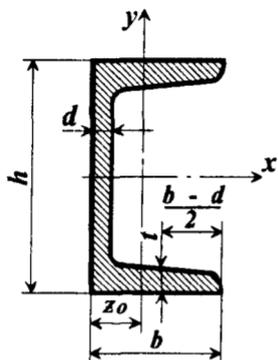


Таблица 2

Сталь горячекатанная
Швеллеры с уклоном внутренних граней полок
ГОСТ 8240 - 72

Но- мер про- фи- ля	Размеры, мм				Пло- щадь сече- ния A , см^2	Масса Γ м, кг	Справочные величины для осей							z_0 , см
	h	b	d	t			x - x				y - y			
							I_x , см^4	W_x , см^3	i_x , см	S_x , см^3	I_y , см^4	W_y , см^3	i_y , см	
5	50	32	4,4	7,0	6,16	4,84	22,8	9,10	1,92	5,59	5,61	2,75	0,945	1,16
6,5	65	36	4,4	7,2	7,51	5,90	48,6	15,0	2,54	9,00	8,70	3,68	1,08	1,24
8	80	40	4,5	7,4	8,98	7,05	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31
10	100	46	4,5	7,6	10,9	8,59	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44
12	120	52	4,8	7,8	13,3	10,4	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54
14	140	58	4,9	8,1	15,6	12,3	491	70,2	5,60	40,8	45,4	11,0	1,70	1,67

Продолжение табл. 2

Но- мер про- фи- ля	Размеры, мм				Пло- щадь сече- ния А, см ²	Масса Ім, кг	Справочные величины для осей						z _o , см	
							x - x			y - y				
	h	b	d	t			I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	S _x , см ³	I _y , см ⁴	W _y , см ³		i _y , см
14a	140	62	4,9	8,7	17,0	13,3	545	77,8	5,66	45,1	57,5	13,3	1,84	1,87
16	160	64	5,0	8,4	18,1	14,2	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,80
16a	160	68	5,0	9,0	19,5	15,3	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2,00
18	180	70	5,1	8,7	20,7	16,3	1090	121	7,24	69,8	86,0	17,0	2,04	1,94
18a	180	74	5,1	9,3	22,3	17,4	1190	132	7,32	76,1	105	20,0	2,18	2,13
20	200	76	5,2	9,0	23,4	18,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,20	2,07
20a	200	80	5,2	9,7	25,2	19,8	1670	167	8,15	95,9	139	21,2	2,35	2,28
22	220	82	5,4	9,5	26,7	21,0	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21
22a	220	87	5,4	10,2	28,8	22,6	2330	212	8,90	121	187	30,0	2,55	2,46
24	240	90	5,6	10,0	30,6	24,0	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,60	2,42
24a	240	95	5,6	10,7	32,9	25,8	3180	265	9,84	151	245	37,2	2,78	2,67
27	270	95	6,0	10,5	35,2	27,7	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	11,0	40,5	31,8	5810	387	12,0	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7,0	11,7	46,5	36,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	12,6	53,4	41,9	10200	601	14,2	350	513	61,7	3,10	2,68
40	400	115	8,0	13,5	61,5	48,3	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75

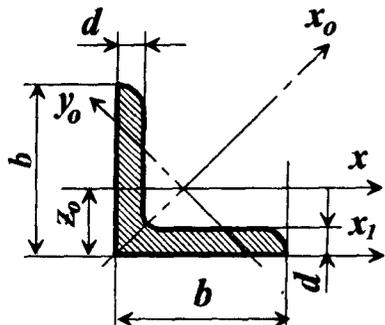


Таблица 3

Сталь прокатная
 угловая равнополочная
 ГОСТ 8509 - 72

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения А, см ²	Масса Iм, кг	Справочные величины для осей							
					x - x		x ₀ - x ₀		y ₀ - y ₀		x ₁ - x ₁	z ₀ , см
					I _x , см ⁴	i _x , см	I _{x₀ max} , см ⁴	i _{x₀ max} , см	I _{x₀ min} , см ⁴	i _{y₀ min} , см	I _{x₁} , см ⁴	
2	20	3	1,13	0,89	0,40	0,59	0,63	0,75	0,17	0,39	0,81	0,60
		4	1,46	1,15	0,50	0,58	0,78	0,73	0,22	0,38	1,09	0,64
2,5	25	3	1,43	1,12	0,81	0,75	1,29	0,95	0,34	0,49	1,57	0,73
		4	1,86	1,46	1,03	0,74	1,62	0,93	0,44	0,48	2,11	0,76
2,8	28	3	1,62	1,27	1,16	0,85	1,84	1,07	0,48	0,55	2,20	0,80

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения А, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей							
	b	d			x - x		x _o - x _o		y _o - y _o		x ₁ - x ₁	z _o , см
					I _x , см ⁴	i _x , см	I _{xo} max, см ⁴	i _{xo} max, см	I _{yo} min, см ⁴	i _{yo} min, см	I _{x1} , см ⁴	
3,2	32	3	1,86	1,46	1,77	0,97	2,80	1,23	0,74	0,63	3,26	0,89
		4	2,43	1,91	2,26	0,96	3,58	1,21	0,94	0,62	4,39	0,94
3,6	36	3	2,10	1,65	2,56	1,10	4,06	1,39	1,06	0,71	4,64	0,99
		4	2,75	2,16	3,29	1,09	5,21	1,38	1,36	0,70	6,24	1,04
4	40	3	2,35	1,85	3,55	1,23	5,63	1,55	1,47	0,79	6,35	1,09
		4	3,08	2,42	4,58	1,22	7,26	1,53	1,90	0,78	8,53	1,13
		5	3,79	2,97	5,53	1,20	8,75	1,54	2,30	0,79	10,73	1,17
4,5	45	3	2,65	2,08	5,13	1,39	8,13	1,75	2,12	0,89	9,04	1,21
		4	3,48	2,73	6,63	1,38	10,5	1,74	2,74	0,89	12,1	1,26
		5	4,29	3,37	8,03	1,37	12,7	1,72	3,33	0,88	15,3	1,30
5	50	3	2,96	2,32	7,11	1,55	11,3	1,95	2,95	1,00	12,4	1,33
		4	3,89	3,05	9,21	1,54	14,6	1,94	3,80	0,99	16,6	1,38
		5	4,80	3,77	11,2	1,53	17,8	1,92	4,63	0,98	20,9	1,42

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения A, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей							
					x - x		x ₀ - x ₀		y ₀ - y ₀		x ₁ - x ₁	z ₀ , см
	b	d			I _x , см ⁴	i _x , см	I _{x0} max, см ⁴	i _{x0} max, см	I _{y0} min, см ⁴	i _{y0} min, см	I _{x1} , см ⁴	
5,6	56	4	4,38	3,44	13,1	1,73	20,8	2,18	5,41	1,11	23,3	1,52
		5	5,41	4,25	16,0	1,72	25,4	2,16	6,59	1,10	29,2	1,57
6,3	63	4	4,96	3,90	18,9	1,95	29,9	2,45	7,81	1,25	33,1	1,69
		5	6,13	4,81	23,1	1,94	36,6	2,44	9,52	1,25	41,5	1,74
		6	7,28	5,72	27,1	1,93	42,9	2,43	11,2	1,24	50,0	1,78
7	70	4,5	6,20	4,87	29,0	2,16	46,0	2,72	12,0	1,39	50,0	1,88
		5	6,86	5,38	31,9	2,16	50,7	2,72	13,2	1,39	56,7	1,90
		6	8,15	6,39	37,6	2,15	59,6	2,71	15,5	1,38	68,4	1,94
		7	9,42	7,39	43,0	2,14	68,2	2,69	17,8	1,37	80,1	1,99
		8	10,7	8,37	48,2	2,13	76,4	2,68	20,0	1,49	91,0	2,02
7,5	75	5	7,39	5,80	39,5	2,31	62,6	2,91	16,4	1,49	69,6	2,02
		6	8,78	6,89	46,6	2,30	73,9	2,90	19,3	1,48	83,9	2,06
		7	10,1	7,96	53,3	2,29	84,6	2,89	22,1	1,48	98,3	2,10
		8	11,5	9,02	59,8	2,28	94,9	2,87	24,8	1,47	113	2,15
		9	12,8	10,1	66,1	2,27	105	2,86	27,5	1,46	127	2,18

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения А, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей							
					x - x		x _o - x _o		y _o - y _o		x ₁ - x ₁	z _o , см
	b	d			I _x , см ⁴	i _x , см	I _{xo} max, см ⁴	i _{xo} max, см	I _{yo} min, см ⁴	i _{yo} min, см	I _{x1} , см ⁴	
8	80	5,5	8,63	6,78	52,7	2,47	83,6	3,11	21,8	1,59	93,2	2,17
		6	9,38	7,36	57,0	2,47	90,4	3,11	23,5	1,58	102	2,19
		7	10,8	8,51	65,3	2,45	104	3,09	27,0	1,58	119	2,23
		8	12,3	9,65	73,4	2,44	116	3,08	30,3	1,57	137	2,27
9	90	6	10,6	8,33	82,1	2,78	130	3,50	34,0	1,79	145	2,43
		7	12,3	9,64	94,3	2,77	150	3,49	38,9	1,78	169	2,47
		8	13,9	10,9	106	2,76	168	3,48	43,8	1,77	194	2,51
		9	15,6	12,2	118	2,75	186	3,46	48,6	1,77	219	2,55
10	100	6,5	12,8	10,1	122	3,09	193	3,88	50,7	1,99	214	2,68
		7	13,8	10,8	131	3,08	207	3,88	54,2	1,98	231	2,71
		8	15,6	12,2	147	3,07	233	3,87	60,9	1,98	265	2,75
		10	19,2	15,1	179	3,05	284	3,84	74,1	1,96	333	2,83
		12	22,8	17,9	209	3,03	331	3,81	86,9	1,95	402	2,91
		14	26,3	20,6	237	3,00	375	3,78	99,3	1,94	472	2,99
11	110	7	15,2	11,9	176	3,40	279	4,29	72,7	2,19	308	2,96
		8	17,2	13,5	198	3,39	315	4,28	81,8	2,18	353	3,00

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения А,	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей							
					x - x		x ₀ - x ₀		y ₀ - y ₀		x ₁ - x ₁	
	b	d			I _x , см ⁴	i _x , см	I _{x0} max, см ⁴	i _{x0} max, см	I _{y0} min, см ⁴	i _{y0} min, см	I _{x1} , см ⁴	z ₀ , см
12,5	125	8	19,7	15,5	294	3,87	486	4,87	122	2,49	516	3,36
		9	22,0	17,3	327	3,86	520	4,86	135	2,48	582	3,40
		10	24,3	19,1	360	3,85	571	4,84	149	2,47	649	3,45
		12	28,9	22,7	422	3,82	670	4,82	174	2,46	782	3,53
		14	33,4	26,2	482	3,80	764	4,78	200	2,45	916	3,61
		16	37,8	29,6	539	3,78	853	4,75	224	2,44	1051	3,68
14	140	9	24,7	19,4	466	4,34	739	5,47	192	2,79	818	3,78
		10	27,3	21,5	512	4,33	814	5,46	211	2,78	911	3,82
		12	32,5	25,5	602	4,31	957	5,43	248	2,76	1097	3,90
16	160	10	31,4	24,7	774	4,96	1229	6,25	319	3,19	1356	4,30
		11	34,4	27,0	844	4,95	1341	6,24	348	3,18	1494	4,35
		12	37,4	29,4	913	4,94	1450	6,23	376	3,17	1633	4,39
		14	43,3	34,0	1046	4,92	1662	6,20	431	3,16	1911	4,47
		16	49,1	38,5	1175	4,89	1866	6,17	485	3,14	2191	4,55
		18	54,8	43,0	1299	4,87	2061	6,13	537	3,13	2472	4,63
		24	60,4	47,4	1419	4,85	2248	6,10	589	3,12	2756	4,70

Номер профи- ля	Размеры, мм		Пло- щадь сечения А, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей							
					x - x		x ₀ - x ₀		y ₀ - y ₀		x ₁ - x ₁	z ₀ , см
	b	d			I _x , см ⁴	i _x , см	I _{x0} max, см ⁴	i _{x0} max, см	I _{y0} min, см ⁴	i _{y0} min, см	I _{x1} , см ⁴	
18	180	11	38,8	30,5	1216	5,60	1933	7,06	500	3,59	2128	4,85
		12	42,2	33,1	1317	5,59	2093	7,04	540	3,58	2324	4,89
20	200	12	47,1	37,0	1823	6,22	2896	7,84	749	3,99	3182	5,73
		13	50,9	39,9	1961	6,21	3116	7,83	805	3,98	3452	5,42
		14	54,6	42,8	2097	6,20	3333	7,81	761	3,97	3722	5,46
		16	62,0	48,7	2363	6,17	3755	7,78	970	3,96	4264	5,54
		20	76,5	60,1	2871	6,12	4560	7,72	1182	3,93	5355	5,70
		25	94,3	74,0	3466	6,06	5494	7,63	1438	3,91	6733	5,89
22	220	14	60,4	47,4	2814	6,83	4470	8,60	1159	4,38	4941	5,93
		16	68,6	53,8	3175	6,81	5045	8,58	1306	4,36	5661	6,02
		16	78,4	61,5	4717	7,76	7492	9,78	1942	4,98	8286	6,75
		18	87,7	68,9	5247	7,73	8337	9,75	2158	4,96	9342	6,83
		20	97,0	76,1	5765	7,71	9160	9,72	2370	4,94	10401	6,91
25	250	22	106,1	83,3	6270	7,69	9961	9,69	2579	4,93	11464	7,00
		25	119,7	94,0	7006	7,65	1112	9,54	2887	4,91	13064	7,11
		28	133,1	104,5	7717	7,61	1224	9,59	3190	4,89	14674	7,23
		30	142,0	11,4	8177	7,59	1296	9,56	3389	4,89	15753	7,31

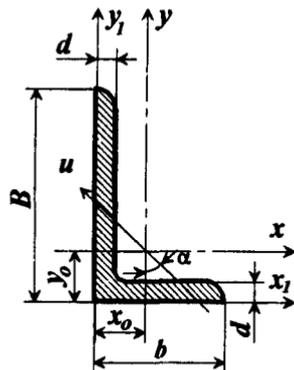


Таблица 4

Сталь прокатная
угловая неравнополочная
ГОСТ 8510

Но- мер про- фи- ля	Размеры, мм			Пло- щадь про- филя A, см ²	Масса 1м, кг	Справочные величины для осей										
	B	b	d			x - x		y - y		x ₁ - x ₁		y ₁ - y ₁		u - u		Угол наклона оси tg α
						I _x , см ⁴	i _x , см	I _y , см ⁴	i _y , см	I _{x₁} , см ⁴	Расстоя- ние от центра тяжести y ₀ , см	I _{y₁} , см ⁴	Расстоя- ние от центра тяжести x ₀ , см	I _u min, см ⁴	i _u min, см	
2,5/1,6	25	16	3	1,16	0,91	0,70	0,78	0,22	0,44	1,56	0,86	0,43	0,42	0,13	0,34	0,392
3,2/2	32	20	3	1,49	1,17	1,52	1,01	0,46	0,55	3,26	1,08	0,82	0,49	0,28	0,43	0,382
				1,94	1,52	1,93	1,00	0,57	0,54	4,38	1,12	1,12	0,53	0,35	0,43	0,374
4/2,5	40	25	3	1,89	1,48	3,06	1,27	0,93	0,70	6,37	1,32	1,58	0,59	0,56	0,54	0,385
				2,47	1,94	3,93	1,26	1,18	0,69	8,53	1,37	2,15	0,63	0,71	0,54	0,381

Номер профиля	Размеры, мм			Площадь профиля A , см^2	Масса m , кг	Справочные величины для осей										
	B	b	d			x - x		y - y		x ₁ - x ₁		y ₁ - y ₁		u - u		Угол наклона оси $\text{tg } \alpha$
						I_x , см^4	i_x , см	I_y , см^4	i_y , см	I_{x_1} min, см^4	Расстояние от центра тяжести y_0 , см	I_{y_1} min, см^4	Расстояние от центра тяжести x_0 , см	I_u min, см^4	i_u min, см	
4,5/2,8	45	28	3	2,14	1,68	4,41	1,43	1,32	0,79	9,02	1,47	2,20	0,64	0,79	0,61	0,382
			4	2,80	2,20	5,68	1,42	1,69	0,78	12,1	1,51	2,98	0,68	1,02	0,60	0,379
5/3,2	50	32	3	2,42	1,90	6,17	1,60	1,99	0,91	12,4	1,60	3,26	0,72	1,18	0,70	0,403
			4	3,17	2,49	7,98	1,59	2,56	0,90	16,6	1,65	4,42	0,76	1,52	0,69	0,401
5,6/3,6	56	36	4	3,58	2,81	11,4	1,78	3,70	1,02	23,2	1,82	6,25	0,84	2,19	0,78	0,406
			5	4,41	3,46	13,8	1,77	4,48	1,01	29,2	1,86	7,91	0,88	2,66	0,78	0,404
6,3/4,0	63	40	4	4,04	3,17	16,3	2,01	5,16	1,13	33,0	2,03	8,51	0,91	3,07	0,87	0,397
			5	4,98	3,91	19,9	2,00	6,26	1,12	41,4	2,08	10,8	0,95	3,73	0,86	0,396
			6	5,90	4,63	23,3	1,99	7,28	1,11	49,9	2,12	13,1	0,99	4,36	0,86	0,393
			8	7,68	6,03	29,6	1,96	9,15	1,09	66,9	2,20	17,9	1,07	5,58	0,86	0,386
7/4,5	70	45	5	5,59	4,35	27,8	2,23	9,05	1,27	56,7	2,28	15,2	1,05	5,34	0,98	0,414
7,5/5	75	50	5	6,11	7,79	34,8	2,30	12,5	1,43	69,7	2,39	20,8	1,17	7,24	1,09	0,436
			6	7,25	5,69	40,9	2,38	14,6	1,42	83,9	2,44	25,2	1,21	8,48	1,08	0,435
			8	9,47	7,43	52,4	2,35	18,3	1,40	112	2,52	34,2	1,29	10,9	1,07	0,430

Продолжение табл. 4

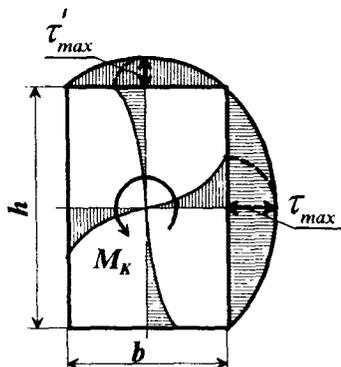
Но- мер про- фи- ля	Размеры, мм			Пло- щадь про- филя A , см^2	Масса m , кг	Справочные величины для осей										Угол накло- на оси $\text{tg } \alpha$
	B	b	d			x - x		y - y		$x_1 - x_1$		$y_1 - y_1$		u - u		
						I_x , см^4	i_x , см	I_y , см^4	i_y , см	I_{x_1} min, см^4	Рассто- яние от центра тяжести y_0 , см	I_{y_1} min, см^4	Рассто- яние от центра тяжести x_0 , см	I_u min, см^4	i_u min, см	
8/5	80	50	5	6,36	4,99	41,6	2,56	12,7	1,41	84,6	2,60	20,8	1,13	7,58	1,09	0,387
			6	7,55	5,92	49,0	2,55	14,8	1,40	102,0	2,65	25,2	1,17	8,88	1,08	0,386
9/5,6	90	56	5	7,86	6,17	65,3	2,88	19,7	1,58	132,0	2,92	32,2	1,26	11,8	1,22	0,384
			6	8,54	6,70	70,6	2,88	21,2	1,58	145,0	2,95	35,2	1,28	12,7	1,22	0,384
			8	11,18	8,77	90,9	2,85	27,1	1,56	194,0	3,04	47,8	1,36	16,3	1,21	0,380
10/6,3	100	63	6	9,59	7,53	98,3	3,2	30,6	1,79	198,0	3,23	49,9	1,42	18,2	1,38	0,393
			7	11,1	8,70	113,0	3,19	35,0	1,78	232,0	3,28	58,7	1,46	20,8	1,37	0,392
			8	12,6	9,87	127,0	3,18	39,2	1,77	266,0	3,32	67,6	1,50	23,4	1,36	0,392
			10	15,5	12,1	154,0	3,15	47,1	1,75	333,0	3,40	85,5	1,58	28,3	1,35	0,387
1/7	110	70	6	11,4	8,98	112,0	3,53	45,6	2,00	286,0	3,55	74,3	1,58	26,9	1,53	0,402
			8	13,9	10,9	172,0	3,51	54,6	1,98	353,0	3,61	92,3	1,64	32,3	1,52	0,400
12,5/8	125	80	7	14,1	11,0	227,0	4,01	73,7	2,29	452,0	4,01	119,0	1,80	43,4	1,76	0,407
			8	16,0	12,5	256,0	4,00	83,0	2,28	518,0	4,05	137,0	1,84	48,8	1,75	0,406
			10	19,7	15,5	312,0	3,98	100,0	2,26	649,0	4,14	173,0	1,92	59,3	1,74	0,404
			12	23,4	18,3	365,0	3,95	117,0	2,24	781,0	4,22	210,0	2,00	69,5	1,72	0,400

Номер про- фи- ля	Размеры, мм			Пло- щадь про- филя A , см^2	Масса m , кг	Справочные величины для осей										Угол накло- на оси $\text{tg } \alpha$
	B	b	d			x - x		y - y		$x_1 - x_1$		$y_1 - y_1$		u - u		
						I_x , см^4	i_x , см	I_y , см^4	i_y , см	I_{x_1} min, см^4	Расстоя- ние от центра тяжести y_0 , см	I_{y_1} min, см^4	Расстоя- ние от центра тяжести x_0 , см	I_u min, см^4	i_u min, см	
14/9	140	90	8	18	14,1	364,0	4,49	120,0	2,58	727,0	4,49	194,0	2,03	70,3	1,98	0,411
			10	22,2	17,5	444,0	4,70	146,0	2,56	911,0	4,58	245,0	2,12	85,5	1,96	0,409
16/10	160	100	9	22,9	18,0	606,0	5,15	186,0	2,85	1221	5,19	300,0	2,23	110	2,20	0,391
			10	25,3	19,8	667,0	5,13	204,0	2,84	1359	5,23	335,0	2,28	121	2,19	0,390
			12	30,0	23,6	784,0	5,11	239,0	2,82	1634	5,32	405,0	2,36	142	2,18	0,388
			14	34,7	27,3	897,0	5,00	272,0	2,80	1910	5,40	477,0	2,43	162	2,16	0,385
18/11	180	110	10	28,3	?,2	952	5,80	276,0	3,12	1933	5,88	444,0	2,44	165	2,42	0,375
			12	33,7	25,4	1123	5,77	324,0	3,10	2324	5,97	537,0	2,52	194	2,52	0,374
20/12,5	200	125	11	34,9	27,4	1449	6,45	446,0	3,58	2920	6,50	718,0	2,79	264	2,75	0,392
			12	37,9	29,7	1568	6,43	482,0	3,57	3189	6,54	786,0	2,83	286	2,74	0,392
			14	43,9	34,4	1801	6,41	551,0	3,54	3726	6,62	922,0	2,91	327	2,73	0,390
			16	49,8	39,1	2026	6,38	617,0	3,52	4264	6,71	1061	2,99	367	2,72	0,388
25/16	250	160	12	48,3	37,9	3147	8,07	1032	4,62	6212	7,97	1634	3,53	604	3,54	0,410
			16	63,6	49,9	4091	8,02	1333	4,58	8308	8,14	2200	3,69	781	3,50	0,408
			18	71,1	55,8	4545	7,99	1475	4,56	9358	8,23	2487	3,77	806	3,49	0,407
			20	78,5	61,7	4987	7,97	1613	4,53	10410	8,31	2776	3,85	949	3,48	0,405

Основные расчетные характеристики
наиболее употребительных материалов

Материал	Модули упругости, ГПа		Температурный коэффициент, $\alpha_t \cdot 10^6$	Кoeffициент Пуассона ν	Плотность ρ , кг/м ³
	E	G			
Сталь	200	80	12,5	0,3	7850
Чугун	120	45	10,0	0,25	7200
Медь	100	40	16,5	0,32	8500
Титан	100	40	8,5	0,3	4500
Алюминий и дюралюминий	70	27	26,0	0,3	2700
Бетон	20	-	0,1	0,16	2500
Дерево (сосна)	10	-	-	-	550

ПРИЛОЖЕНИЕ 6



Данные по расчету на кручение стержней прямоугольного сечения

Момент инерции $I_K = \alpha b^4$
Момент сопротивления $W_K = \beta b^3$

Наибольшие касательные напряжения, возникающие посередине:

- длинных сторон $\tau_{max} = M_K / W_K$;

- коротких сторон $\tau_{max} = \gamma \tau_{max}$.

Значения коэффициентов α , β , γ зависят от отношения $m = h / b$ и приведены в следующей таблице:

m	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0
α	0,140	0,294	0,457	0,790	1,123	1,789	3,123
β	0,208	0,346	0,493	0,801	1,128	1,789	3,123
γ	1,000	0,859	0,795	0,753	0,745	0,743	0,742

Механические характеристики конструкционных материалов

М А Т Е Р И А Л	Напряжения, МПа				δ, %
	$\sigma_{ПЧ}$	σ_T	σ_{-1}	τ_{-1}	
1 КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ					
1 1 Углеродистые стали					
20	420	250	170	100	25
30	480	280	200	110	21
35	540	320	220	130	20
40	580	340	230	140	19
45	610	360	250	150	16
50	640	380	270	160	14
60	690	410	310	180	12
1 2 Легированные стали					
20Х (40Х), отжиг	700	400	310	170	25
12ХНЗА, закалка	950	700	390	220	9
40Х (40ХН), закалка, отпуск 600°C	1000	800	400	240	9
12Х2МВ8ФВ (ЭИ503)	1050	600	420	250	15
40ХНМА, закалка, отпуск 560°C	1100	940	500	270	10
18ХГТ (18ХГМ), закалка	1150	950	520	280	9
40Х (40ХН), закалка, отпуск 500°C	1200	1100	460	230	6
18Х2Х4МА (18ХНВА), закалка	1300	1000	580	320	10
30ХГСН, изотермическая закалка 330°C	1600	720	600	360	8
30ХГСА, закалка	1700	1500	700	400	8
2 АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ					
АК4, закалка, искусст старение	400	200	130	80	15
Д16Т, закалка, естест старение	500	340	140	120	8
В95, закалка, искусст старение	650	550	260	160	7
3 ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ (термообработанные)					
BT3-1	950	850	480	300	18
BT6	1050	950	500	310	14
BT8	1200	1100	600	360	12
BT14	1400	1200	700	420	10

Механические свойства и допускаемые напряжения конструкционных сталей

Качественные углеродистые стали

Таблица 1

Марка стали ГОСТ 1050-74	Термо- обра- ботка*	Предел прочности при растяжении σ_B	Предел текучести σ_l	Предел выносливости при			Допускаемые напряжения **, МПа													
				растяжения σ_{1p}	изгибе σ_1	кручении τ_1	при													
							растяжении		изгибе		кручении		срезе			смятии				
							{ σ_p }			{ $\sigma_{из}$ }			{ $\tau_{кр}$ }			{ $\tau_{ср}$ }		{ $\sigma_{см}$ }		
МПа							I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II			
8	H	330	200	120	150	90	110	80	60	130	95	75	80	60	45	60	45	35	165	120
10	H	340	210	125	155	95	110	80	60	145	100	75	80	60	45	65	45	35	165	120
	Ц-В59	400	250	145	180	110	130	90	70	155	115	90	100	65	55	70	50	40	195	135
15	H	380	230	135	170	100	125	85	65	150	110	85	95	65	50	75	50	40	185	125
	Ц В59	450	250	160	200	120	145	50	80	175	125	100	110	80	60	85	60	45	210	75
20	H	420	250	150	190	115	140	115	95	170	120	95	105	70	55	85	60	45	210	175
	Ц-В59	500	300	180	225	135	165	115	90	200	140	110	125	75	55	100	60	45	240	175
25	H	460	280	170	210	125	150	110	85	180	130	105	110	80	60	90	65	50	220	165
	Ц-В58	550	350	200	250	150	180	130	100	210	160	125	135	95	75	110	80	60	270	195
30	H	500	300	180	225	135	165	115	90	200	140	110	125	90	70	100	65	55	240	175
	У	600	350	215	270	160	200	140	105	240	175	135	150	105	80	120	85	65	300	210
35	H	540	320	190	240	145	180	125	95	210	155	120	135	90	70	110	75	55	270	190
	У	650	380	230	290	175	210	150	115	260	185	145	160	110	85	130	90	70	520	220
	В35	1000	650	360	450	270	330	230	180	400	290	220	250	165	135	200	140	110	500	350
40	H	580	340	210	260	155	190	130	105	230	165	130	140	100	75	115	80	60	280	200
	У	700	400	250	315	190	230	160	125	270	200	155	170	120	95	140	100	80	340	240
	В35	1000	650	360	450	270	340	230	180	400	290	220	250	175	135	200	140	110	500	350
45	H	610	360	220	275	165	200	140	110	240	175	135	150	105	80	125	85	65	300	210
	У	750	450	270	340	190	240	170	135	290	215	170	185	130	100	145	105	80	360	260
	М35	900	650	325	405	270	300	210	160	360	260	200	230	165	120	185	125	95	450	310

Марка стали ГОСТ 1050-74	Термо- обра- ботка*	Предел прочности при растяжении σ_B	Предел теку- чести σ_T	Предел выносливости при			Допускаемые напряжения** МПа													
				растя- жении σ_{-1P}	изгибе σ_{-1}	кру- чении τ_{-1}	растяжении			изгибе			кручении			срезе			смятии	
							[σ_P]			[$\sigma_{из}$]			[$\tau_{кр}$]			[$\tau_{ср}$]			[$\sigma_{см}$]	
				МПа						I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II
45	B42	900-1200	700	325	405	245	300	210	160	360	260	200	230	160	120	185	125	95	450	310
	B48	1200	950	430	540	325	400	280	210	480	340	270	300	210	160	240	170	130	600	420
	ТВЧ56	750	450	270	340	205	240	170	135	290	210	170	185	130	100	145	80	360	260	
50	H	640	380	230	290	175	210	140	115	250	185	145	160	110	85	125	85	65	310	220
	У	900	700	325	405	245	300	210	160	360	260	200	230	180	120	185	125	95	450	310
20Г	H	460	280	165	205	125	150	100	80	180	130	100	110	80	60	90	65	50	220	160
	В	570	420	205	255	150	195	130	100	230	165	125	145	100	75	115	80	60	290	190
30Г	H	550	320	200	250	150	180	130	100	210	160	125	135	95	75	110	80	60	270	190
	В	680	560	245	305	180	230	160	120	270	195	150	170	120	90	140	100	75	340	240
40Г	H	600	360	220	270	160	200	140	110	240	175	135	150	105	80	120	85	65	300	210
	B45	840	590	350	380	230	280	190	150	330	240	190	210	150	115	170	120	95	420	290
50Г	H	660	400	235	295	175	210	150	115	260	185	145	160	110	75	130	90	70	320	220
	В	820	560	300	370	220	270	190	150	330	250	185	250	155	110	165	105	75	410	290
65Г	H	750	440	270	340	200	240	175	135	290	210	170	185	130	100	145	105	80	360	260
	У	900	700	325	405	245	300	210	160	360	260	200	230	160	120	185	125	95	450	310
	M45	1500	125	530	670	400	500	350	260	600	430	330	380	260	200	300	210	160	760	520

*Условные обозначения термической обработки в табл. 1-2 : О - отжиг; Н - нормализация; У - улучшение; Ц - цементизация; ТВЧ - закалка с нагревом т.в.ч. ; В - закалка с охлаждением в воде; М - закалка с охлаждением в масле; НВ - твердость по Бринеллю. Число после М, В, Н или ТВЧ - среднее значение твердости по НРС.

** Римскими цифрами обозначен вид нагрузки : I - статическая; II - переменная, действующая от нуля до максимума и от максимума до нуля (пульсирующая); III - знакопеременная.

Марка стали	Термообработка*	Предел прочности при растяжении σ_B	Предел текучести σ_T	Предел выносливости при			Допускаемые напряжения **, МПа													
				растяжения σ_{-1p}	изгибе σ_{-1}	кручении τ_{-1}	растяжения			изгибе			кручения			срезе			смятии	
							[σ_p]	[σ_m]	[$\tau_{кр}$]	[$\tau_{ср}$]	[$\sigma_{см}$]	[$\sigma_{сд}$]								
МПа							I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II
10Г2	Н	430	250	175	220	125	140	110	90	170	135	110	105	75	60	85	65	50	210	165
09Г2С	-	500	350	190	240	140	170	120	95	200	150	120	125	90	70	100	70	55	250	180
10ХСД	-	540	400	215	270	155	185	140	110	220	160	135	140	100	80	110	80	65	280	210
20Х	Н	600	300	210	260	150	190	135	105	230	165	130	140	100	75	115	85	60	280	200
	У	700	500	280	350	200	240	175	140	290	220	175	180	130	100	145	105	80	360	260
	М59	850	630	340	420	240	290	210	170	350	145	210	220	155	120	175	125	95	430	320
40Х	Н	630	330	250	310	180	200	155	125	240	190	155	150	115	90	120	95	75	300	230
	У	800	650	320	400	230	270	200	160	320	250	200	200	150	115	160	115	90	400	300
	М39	1100	900	440	550	320	380	280	220	450	340	270	280	200	160	230	165	130	560	420
	М48	1300	1100	520	650	380	440	330	260	530	410	320	330	240	190	270	195	150	670	490
45Х	Н	650	350	260	320	185	210	160	130	250	195	160	155	115	90	125	95	75	310	240
	У	950	750	380	470	270	320	240	190	380	290	230	240	175	135	190	135	105	480	360
	М48	1400	1200	560	700	400	480	350	280	570	430	350	360	260	200	290	200	160	720	520
50Х	Н	650	350	260	325	185	210	160	130	250	200	160	160	120	90	125	90	70	310	240
	М48	1500	1300	600	750	430	500	370	300	600	460	370	370	270	210	300	220	170	750	550
35Г2	Н	630	370	250	315	180	200	155	125	240	190	160	150	115	90	120	95	75	330	230
	В, НВ249	800	650	320	400	230	270	200	160	320	250	200	200	145	115	160	115	90	400	300
40Г2	Н	670	390	270	335	195	220	170	135	260	210	170	165	120	95	130	95	75	330	250
	М, НВ331	1120	950	540	660	380	380	310	270	460	380	330	290	230	190	230	180	150	580	460
45Г2	Н	700	410	280	350	200	230	175	140	270	210	175	175	125	100	140	100	80	340	260
	М, НВ295	850	700	340	425	245	290	210	170	350	145	210	220	155	120	175	125	95	440	330

Марка стали	Термообработка*	Предел прочности при растяжении σ_B	Предел текучести σ_T	Предел выносливости при			Допускаемые напряжения **, МПа													
				растяжения σ_{-1p}	изгибе σ_{-1}	кручения τ_{-1}	растяжении			изгибе			кручения			срезы			смятии	
							[σ_p]			[$\sigma_{из}$]			[$\tau_{кр}$]			[$\tau_{ср}$]			[$\sigma_{см}$]	
МПа							I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II
33ХС	Н М	600 900	300 700	210 360	260 450	150 260	190 300	135 220	105 180	230 360	165 280	130 220	140 230	100 165	75 130	115 180	65 105	60 105	280 450	200 330
38ХС	У	950	750	370	470	280	320	230	185	390	290	230	240	175	140	190	140	110	480	350
18ХГТ	Н	700	430	280	350	200	230	175	140	270	210	175	125	100	140	100	80	340	260	
	Ц-М59	1000	800	400	500	290	330	250	200	400	310	250	185	145	200	145	115	490	380	
30ХГТ	М43	1250	1050	500	620	360	430	310	250	510	390	310	320	230	180	260	185	140	640	460
	Ц-М59	1100	800	440	550	320	370	270	220	440	340	270	280	200	160	220	160	125	550	410
20ХГНР	М40	1300	1200	520	650	375	450	330	260	540	410	320	340	230	170	270	180	135	680	500
	М50	1450	1400	580	725	420	500	360	290	600	450	360	380	270	210	300	215	170	750	540
40ФХА	М30	900	750	360	450	260	320	230	180	380	280	220	240	170	130	190	135	105	480	340
	М50	1600	1300	640	800	480	550	410	320	660	500	400	410	310	240	330	240	195	820	610
30ХМ	М	950	750	380	475	230	320	240	190	390	300	240	240	155	115	190	125	90	480	360
35ХМ	М, НВ270	1000	850	400	500	290	340	250	200	410	310	250	260	185	145	200	130	950	520	380
	М50	1600	140	640	800	480	550	410	320	660	500	400	420	310	240	330	250	200	820	610
40ХН	Н	780	460	310	390	225	260	195	160	310	240	195	190	140	110	155	115	90	390	290
	М43	1200	100	480	600	345	410	310	240	490	370	300	310	220	170	250	175	135	620	460
12ХН2	М	800	600	320	400	230	270	200	160	320	250	200	200	145	115	160	115	90	400	300
	Ц-М59	800	600	320	400	230	270	200	160	320	250	200	200	145	115	160	115	90	400	300

Продолжение табл. 2

Марка стали	Термообработка*	Предел прочности при растяжении σ_B	Предел текучести σ_T	Предел выносливости при			Допускаемые напряжения **, МПа													
				растяжении σ_{-1P}	изгибе σ_{-1}	кручении τ_{-1}	при													
							растяжении			изгибе			кручении			срезе			смятии	
							[σ_p]			[$\sigma_{из}$]			[$\tau_{кр}$]			[$\tau_{ср}$]			[$\sigma_{см}$]	
МПа							I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II
12ХНЗА	У	950	700	380	470	270	320	240	190	380	280	230	240	175	140	190	140	110	480	300
	ТВЧ59	1000	850	400	500	300	340	260	200	410	310	250	250	190	150	200	150	120	510	380
20Х2Н4А	ТВЧ59	680	450	270	340	200	230	170	135	270	210	170	170	125	100	140	100	80	340	260
	Ц-М59	1100	850	440	550	320	370	270	220	440	340	270	280	200	160	220	160	125	550	410
	М	1300	1100	520	650	375	440	330	260	530	400	320	330	240	190	260	190	150	660	500
20ХГСА	М	800	650	320	400	230	270	200	160	330	250	200	200	145	115	160	115	90	410	300
30ХГС 30ХГСА	О	600	360	240	300	170	200	150	120	240	185	150	150	110	85	120	90	70	300	220
	У	1100	850	440	550	320	370	270	220	440	340	270	280	200	160	220	160	125	550	410
	М46	1500	1300	600	750	430	510	380	300	620	470	380	390	270	210	310	220	170	760	570
38Х210	М	800	700	320	400	230	280	200	160	330	250	200	200	150	115	170	120	95	410	300
	М	900	750	360	450	260	310	240	190	370	290	240	230	170	135	185	140	110	460	360
50ХФА	М	1300	1100	520	650	340	440	330	260	540	400	320	340	220	170	260	180	135	660	500
	М46	1500	1300	600	750	360	520	380	300	620	470	380	390	240	180	310	200	145	770	570
60С2 60С2А	М,НВ269	1300	1200	520	650	340	440	330	260	540	400	320	340	220	170	260	180	135	670	550
	М,НВ269	1600	1400	640	800	465	550	400	320	660	500	400	410	300	230	330	240	185	820	600
ШХ15	О	600	3800	240	300	180	200	150	120	240	180	150	150	110	90	120	90	75	300	220
	М62	2200	1700	460	660	330	740	350	230	890	480	330	550	250	165	440	200	130	1100	520

* Условные обозначения термообработки указаны в конце табл. 1.

** Римскими цифрами обозначен вид нагрузки, см. табл. 1.

ДАННЫЕ К РАСЧЕТАМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты продольного изгиба φ (увеличенные в 1000 раз)

Материал	Г и б к о с т ь л														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
АМг	973	945	917	870	770	685	603	530	465	415	365	327	296	265	235
АМг6	973	946	890	770	640	542	458	387	322	280	243	213	183	162	148
АВТ1	996	992	900	780	660	557	463	387	312	252	210	175	150	129	113
Д16Т	999	998	835	700	568	455	353	269	212	172	142	119	101	87	76
Ст2, Ст3 Ст4	990	970	950	920	890	860	810	750	690	600	520	450	400	360	320
Ст5	980	950	930	900	840	800	740	660	590	500	430	380	320	280	270
НЛ-2 15ХСНД	980	950	930	900	830	780	710	630	540	450	390	330	290	260	230
СЧ12, 15 СЧ18, 21	970	910	810	690	570	440	340	260	200	160	-	-	-	-	-
СЧ24, СЧ28	950	870	750	600	430	320	230	180	140	120	-	-	-	-	-
Сосна	990	970	930	870	800	710	610	490	380	310	250	220	180	160	140

Т а б л и ц а 2

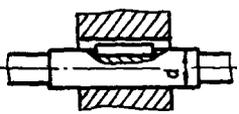
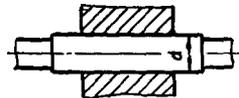
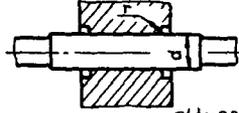
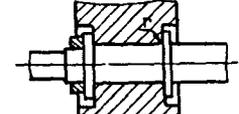
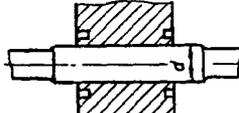
Значения коэффициентов, входящих в эмпирическую формулу
Тетмайера-Ясинского для критической силы, и пределы
применимости этой формулы

N п/п	М а т е р и а л	E, ГПа	a	b	c	$\lambda_{пц}$ (λ_1)	$\lambda_{пред}$ (λ_2)
			МПа				
1	С о с н а	10	40	0,203	-	60	-
2	С т а л ь Ст3	200	310	1,14	-	100	61
3	Ст5, сталь 30	200	464	3,26	-	90	60
4	15ХСНД (НЛ2)	200	589	3,82	-	100	60
5	Авиаль АВТ1	70	320	1,70	-	55	22
6	Дюралюминий Д16Т	70	380	2,19	-	50	20
7	Ч у г у н	120	776	12	0,053	80	

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТАМ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

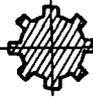
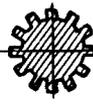
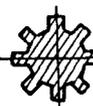
Т а б л и ц а 1

Валы $d = 40$ мм с посадками ступиц

Форма ступицы	Посадка	K_{σ} при $\sigma_{Пч}$, МПа									
	H7/n6										
		1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	
	H8/u8										
 $r/d > 0,06$	H8/u8	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	
 $r/d > 0,06$	H7/n6	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1	3,2	3,2	
	H8/u8	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	

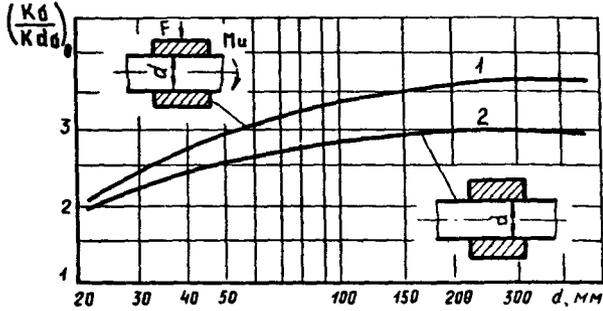
Примечание. $K_{\tau} = 0,65 K_{\sigma}$.

Шлицевые валы при кручении

Сечение вала и профиль шлица	Предел прочности материала вала $\sigma_{пч}$, МПа	K_{τ}
6×28×34×7 	400	1,9
	500	2,0
	650	2,1
	1100	3,1
6×29×35×8,8 	600	1,9
	750	2,1
	1000	2,6
	1200	3,2
8×32×36×6 	1000	2,0
10×32×40×5 		2,3
A4×32×38×10 		2,3
8×32×38×6 		2,8

Примечание. Материал ступицы – сталь с пределом прочности 650 МПа.

Валы с напрессованными деталями при изгибе



Для случая, когда $\sigma_{\text{ПЧ}} = 500$ МПа, давление напрессовки $p \geq 30$ МПа:

- 1 - через напрессованную деталь передается сила или момент;
- 2 - через напрессованную деталь не передается усилий

Рис. 1

Поправочный коэффициент ξ' на предел прочности $\sigma_{\text{ПЧ}}$ (к рис. 1)

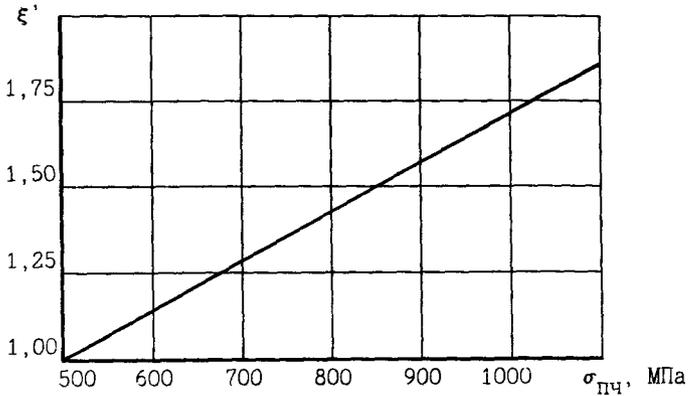


Рис. 2

Поправочный коэффициент ξ'' на давление
напрессовки p (к рис. 1)

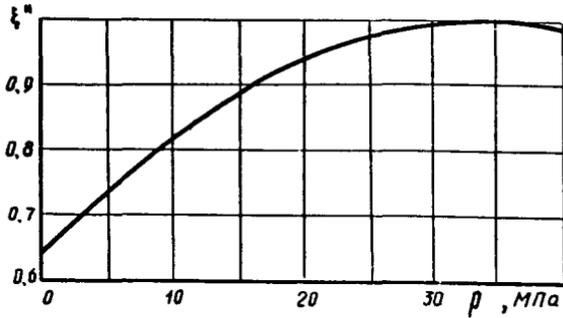


Рис. 3

Валы с поперечным отверстием при растяжении-сжатии

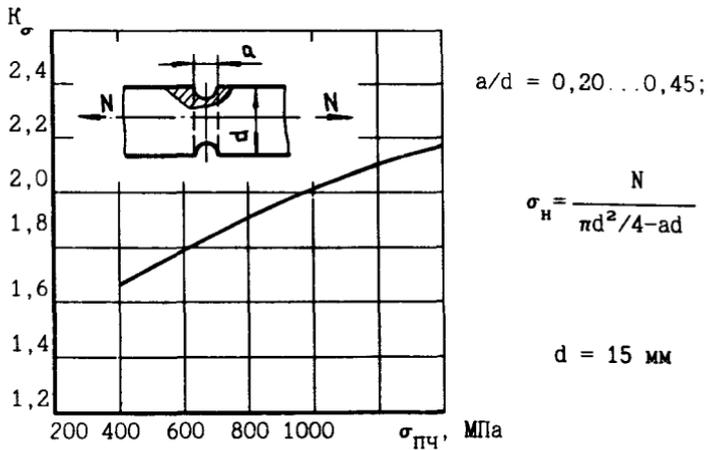
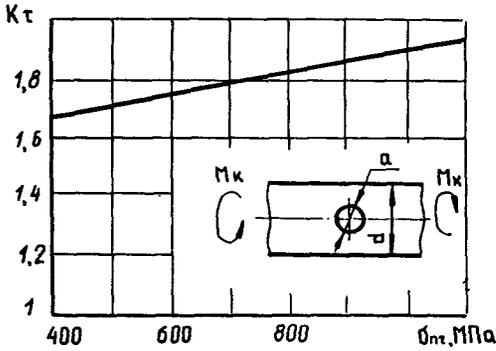


Рис. 4

Валы с поперечным отверстием при кручении

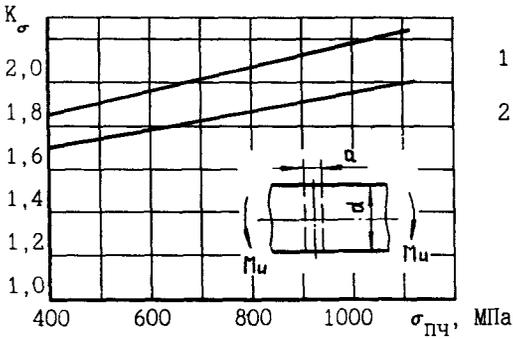


$$a/d = 0,05 \dots 0,25 ; \quad \tau_H = M_k / W_k \text{ НЕТТО}$$

при $d = 30 \dots 50$ мм

Рис. 5

Валы с поперечным отверстием при изгибе



$$1 - a/d = 0,05 \dots 0,10;$$

$$2 - a/d = 0,15 \dots 0,25;$$

$$\sigma_H = M_u / W \text{ НЕТТО}$$

при $d = 30 \dots 50$ мм

Рис. 6

Ступенчатые валы

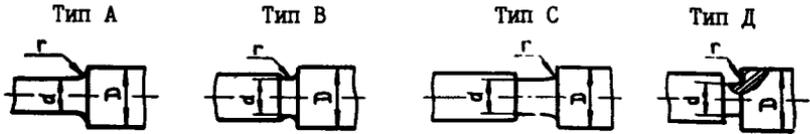
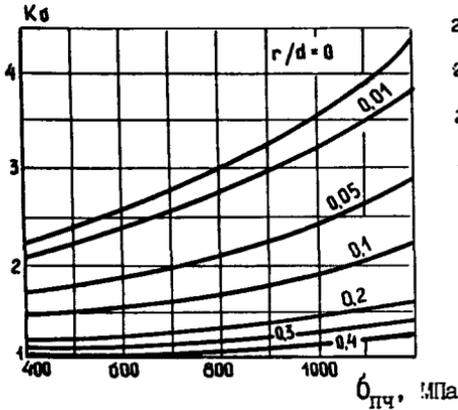
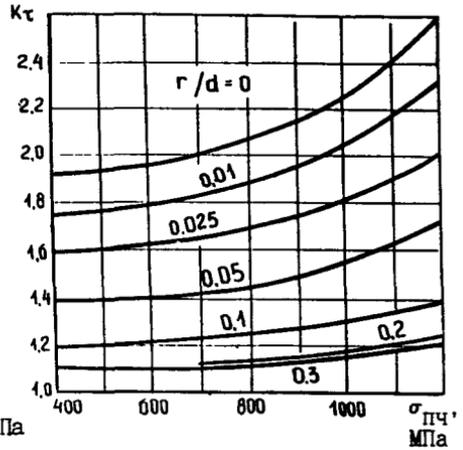


Рис. 7



$D/d = 2$, $d = 15$ мм, $R_z = 10$ мкм

Рис. 8



$D/d = 1,4$; $d = 15$ мм; $R_z = 10$ мкм

Рис. 9

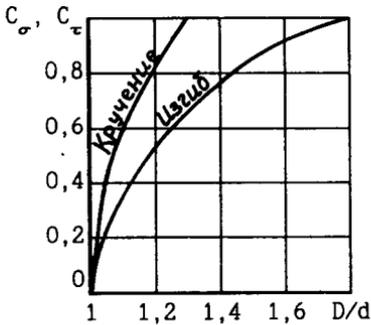


Рис. 10

Коэффициенты пересчета C
(к рис. 8 и 9)

$$K_{\sigma} = 1 + C_{\sigma} (K_{\sigma(D/d=2)} - 1);$$

$$K_{\tau} = 1 + C_{\tau} (K_{\tau(D/d=1,4)} - 1)$$

Тип Е

Тип F

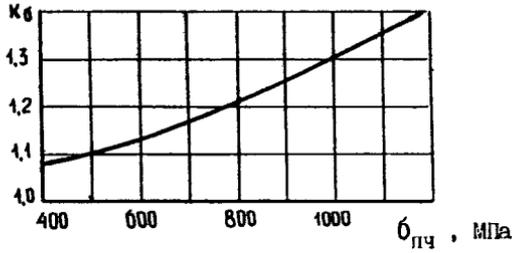
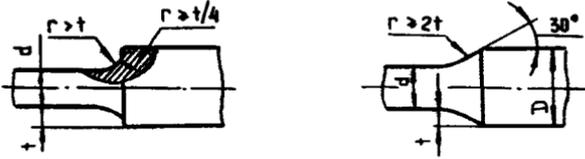


Рис. 11

Коэффициенты K_σ , K_τ для валов со шпоночными пазами типа А и В

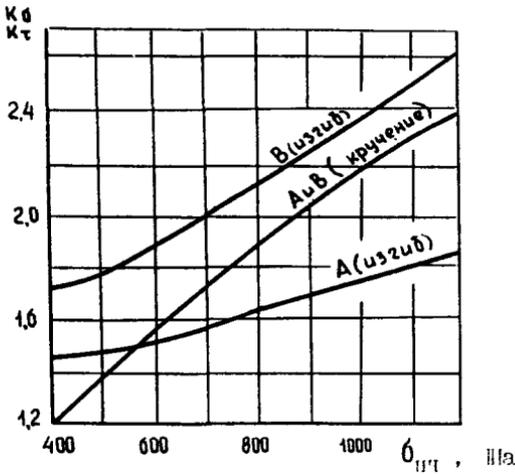
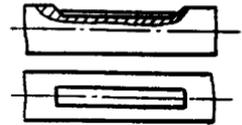
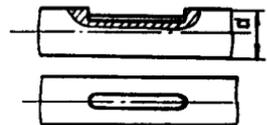


Рис. 12

Тип А



Тип В



$d = 15$ мм,
 $R_z = 10$ мкм

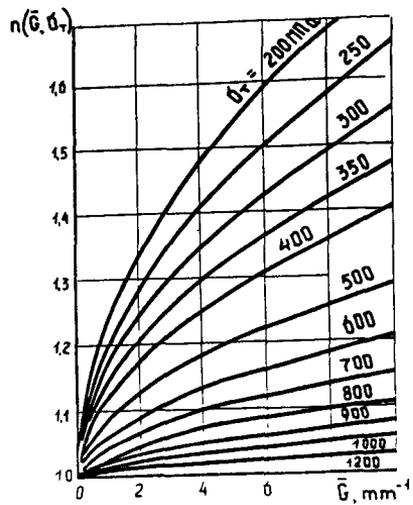


Рис. 13

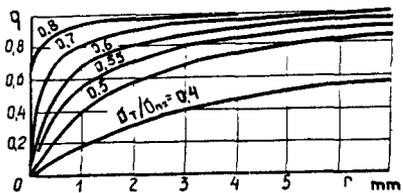


Рис. 14

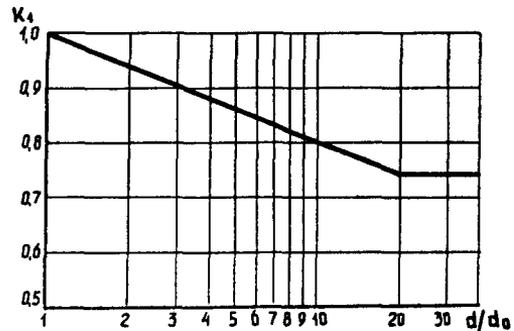


Рис. 15

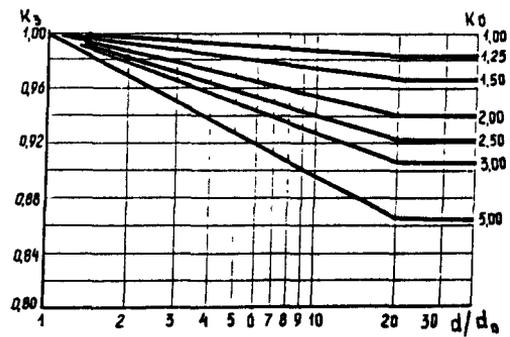
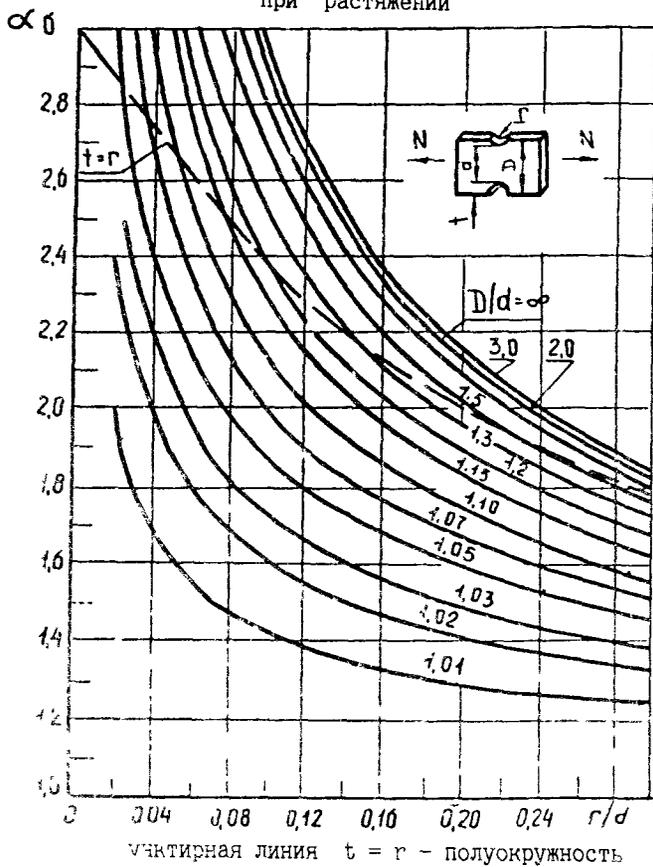


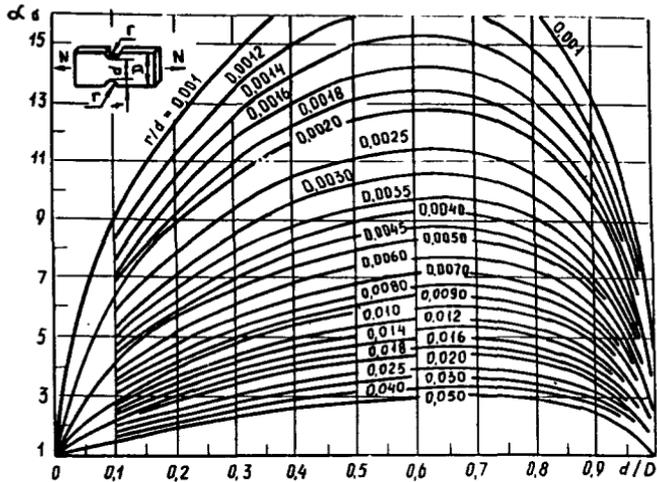
Рис. 16

Пластины с двусторонним надрезом
при растяжении

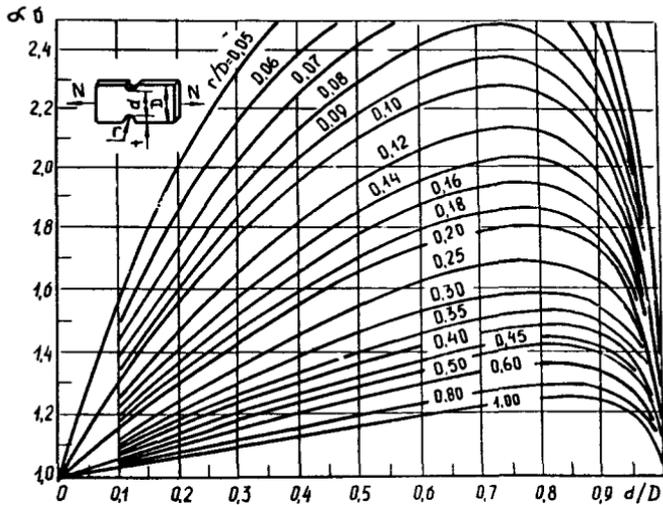


$r / d = 0,02 \quad 0,30$

Рис 17



$$0,001 \leq r / D \leq 0,050$$



$$0,05 \leq r / D \leq 1,00$$

Рис. 18

Пластины с двусторонним надрезом

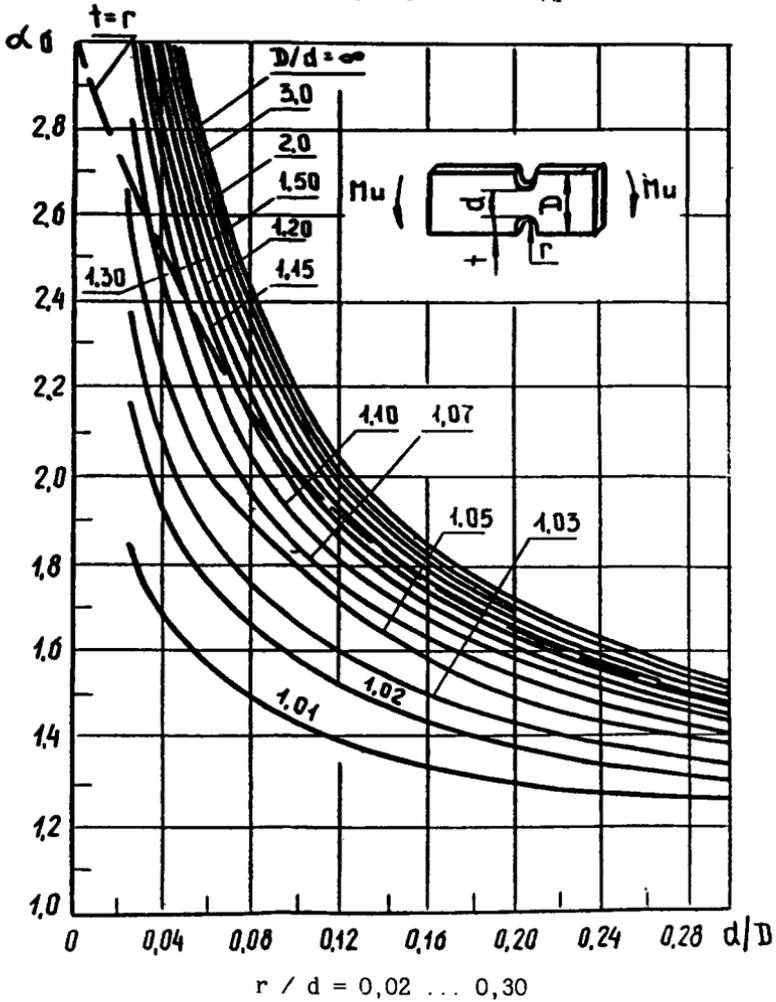
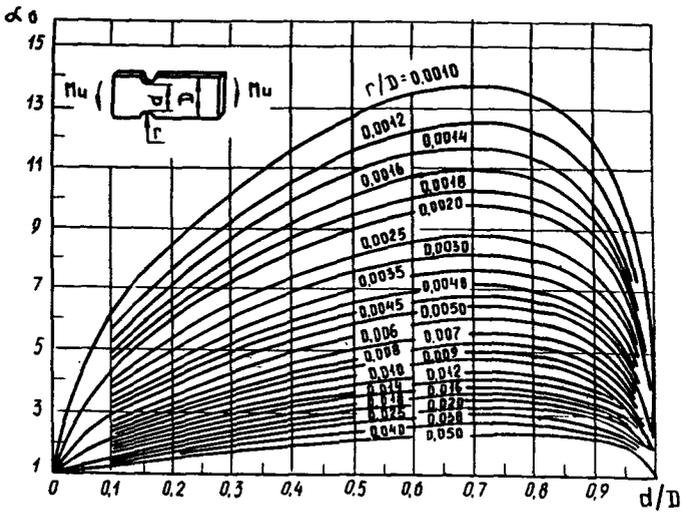
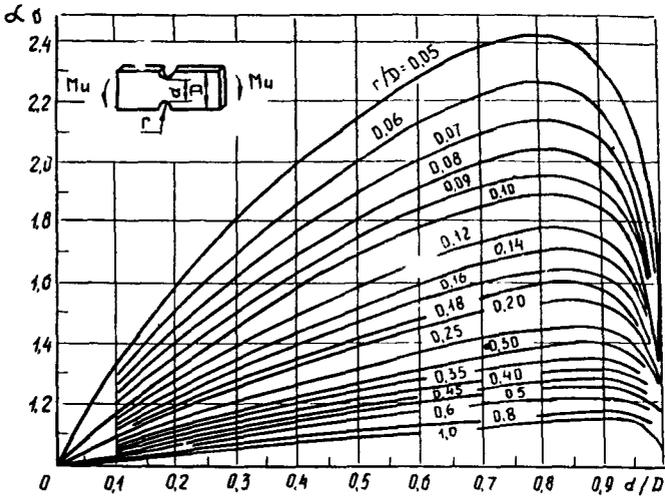


Рис. 19



$$0,001 \leq r / D \leq 0,05$$



$$0,05 \leq r / D \leq 1,00$$

Рис 20

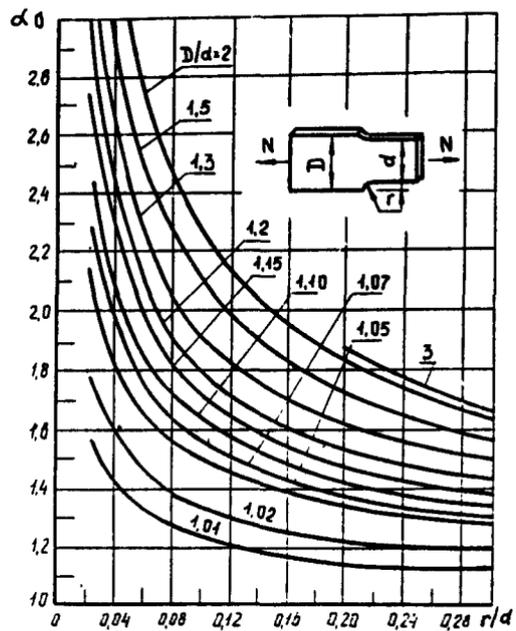


Рис. 21

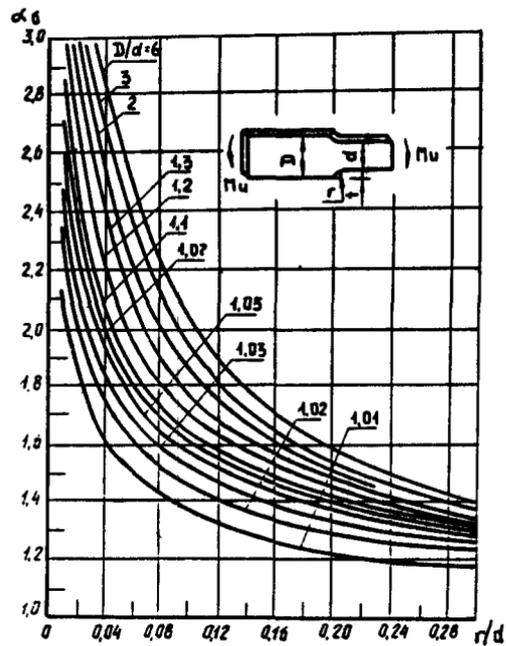


Рис. 22

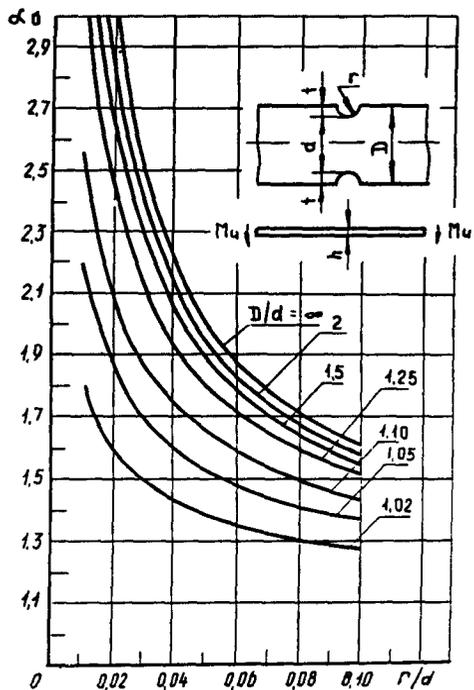


Рис. 23

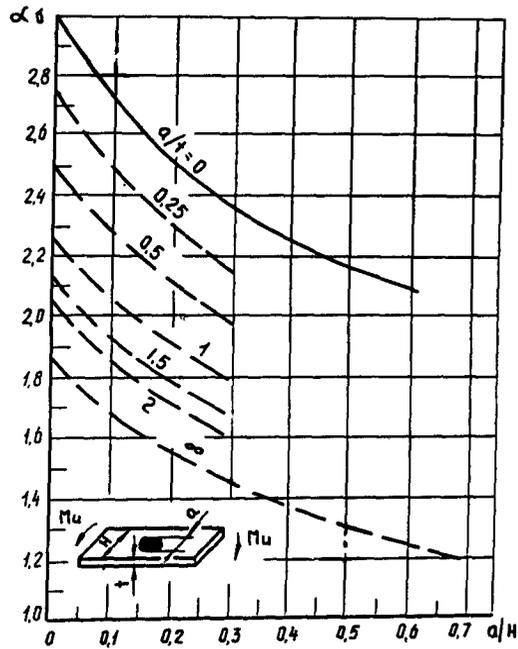


Рис. 24

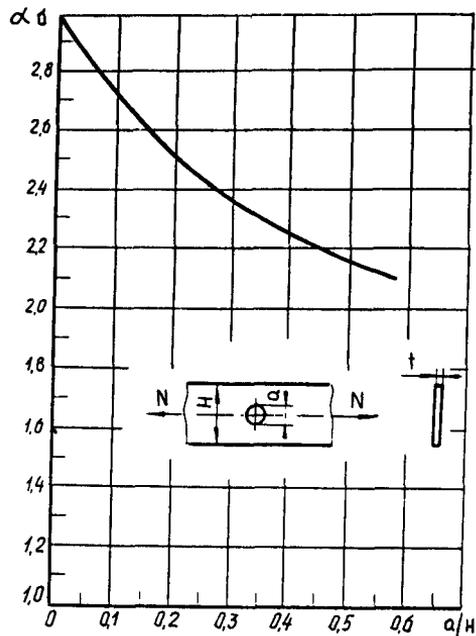
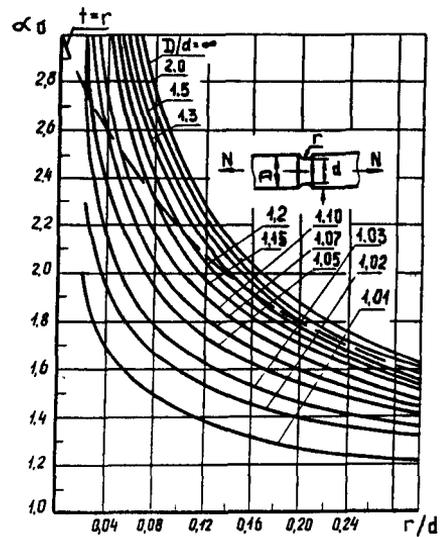
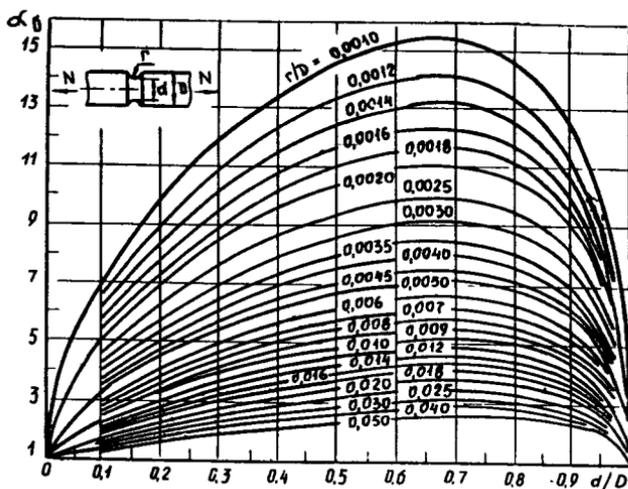


Рис. 25

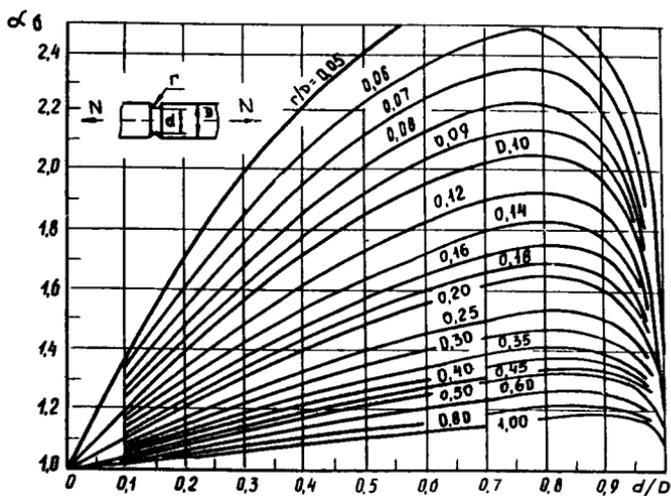


$r/d = 0,02 \dots 0,50$

Рис. 26



$$0,01 \leq r / D \leq 0,050$$



$$0,050 \leq r / D \leq 1,00$$

Рис. 27

Валы с выточкой при кручении

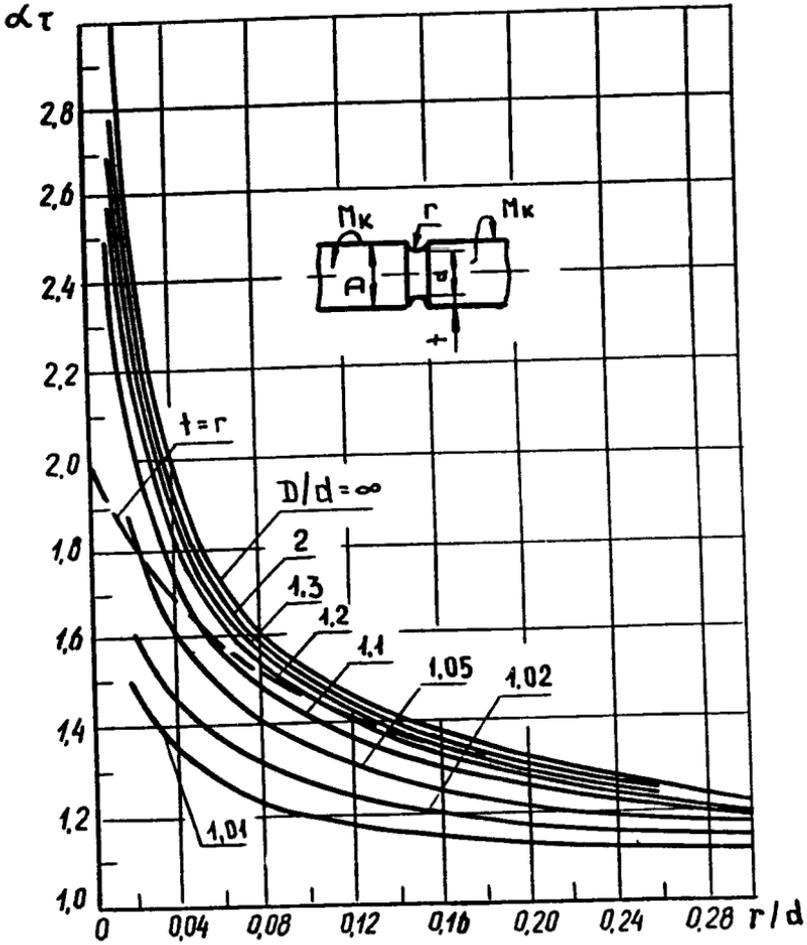


Рис. 28

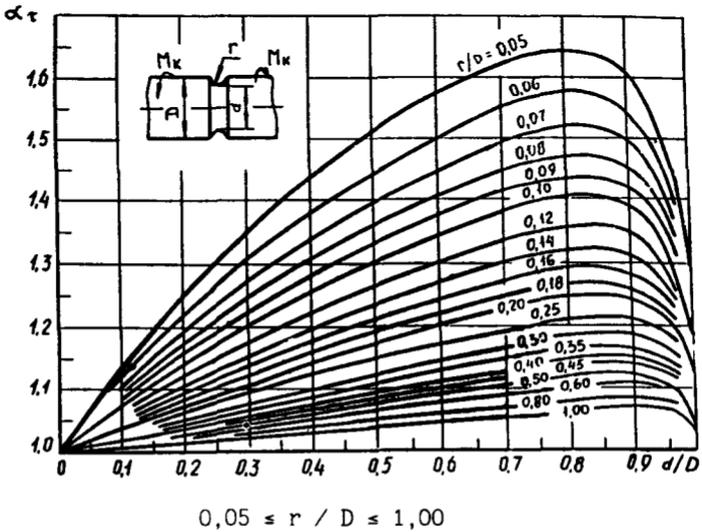
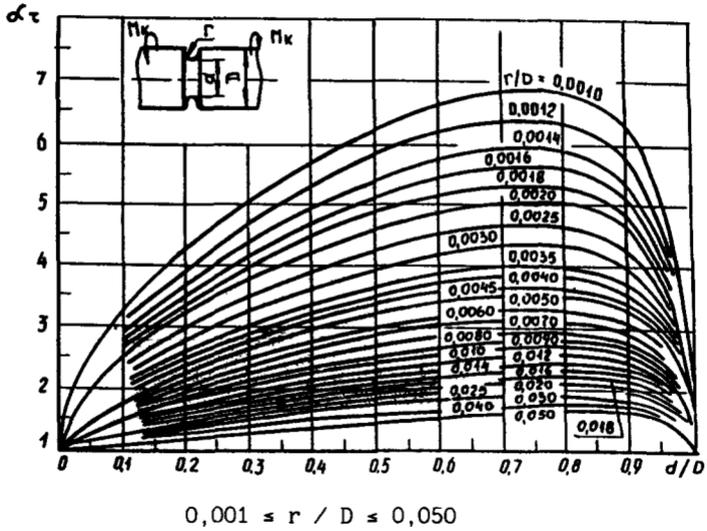


Рис 29

Валы с выточкой при изгибе

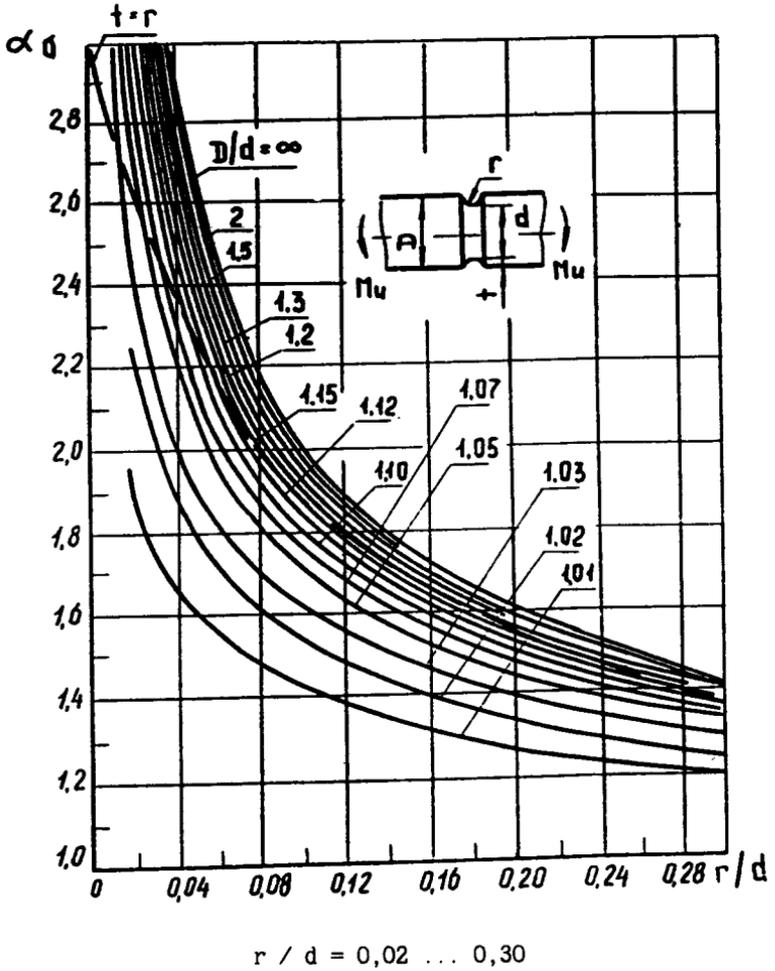
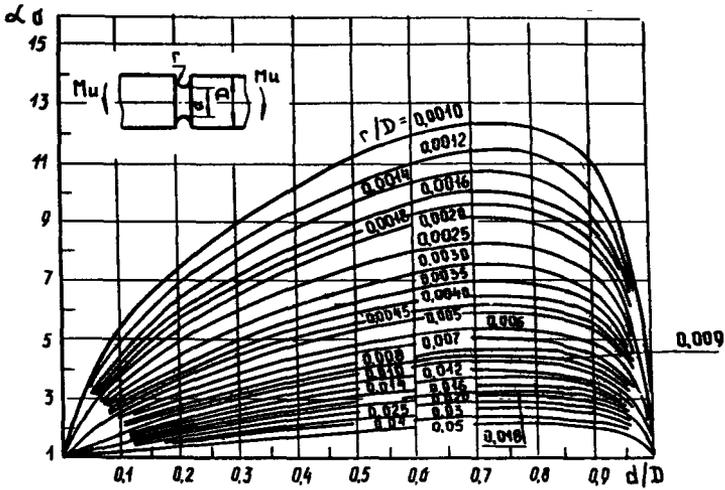
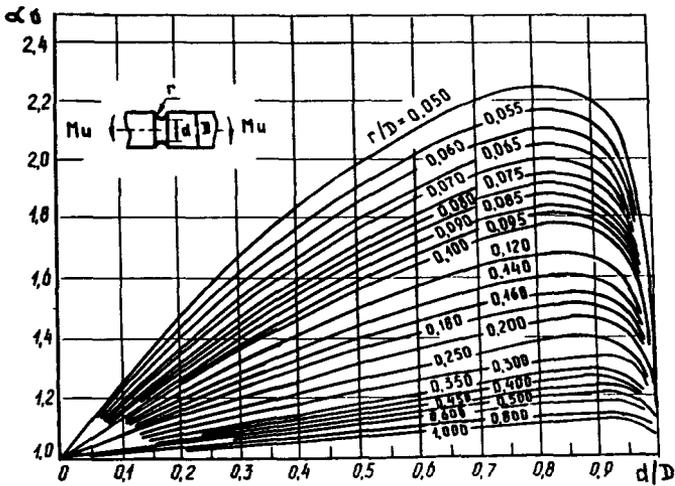


Рис. 30

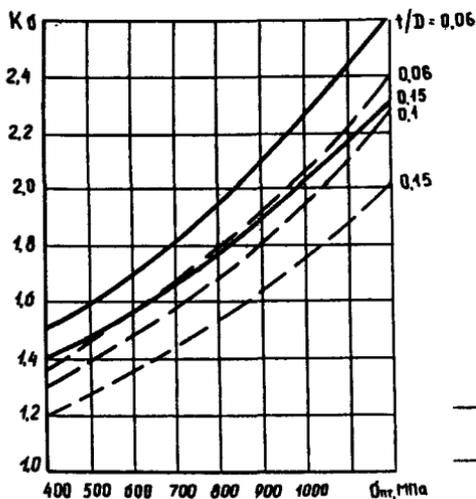


$$0,001 \leq r / D \leq 0,05$$

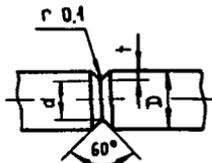


$$0,050 \leq r / D \leq 1,00$$

Рис. 31



Валы с v - образной
кольцевой выточкой

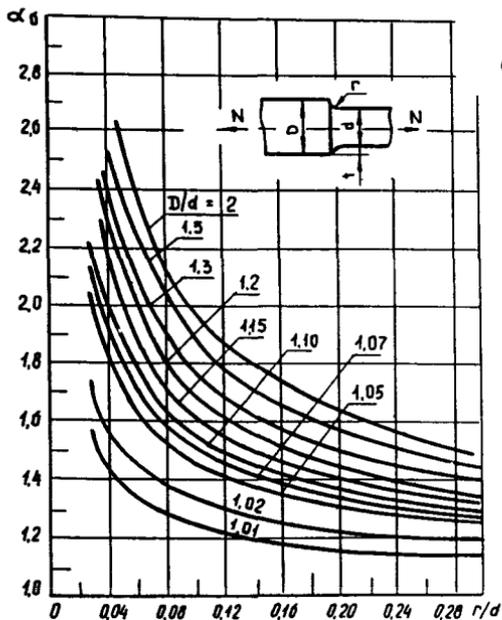


$d = 15 \text{ мм}, R_z = 20 \text{ мкм}$

————— растяжение-сжатие;

----- изгиб

Рис. 32



Ступенчатый вал с галтелью
при растяжении

Рис. 33

Ступенчатый вал с галтелью при кручении

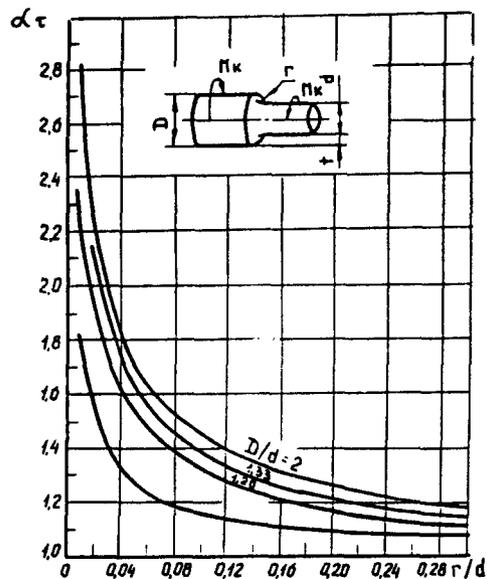


Рис. 34

Ступенчатый вал с галтелью при изгибе

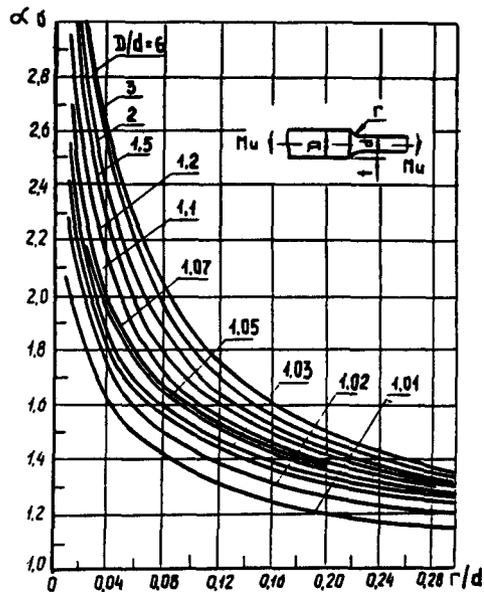
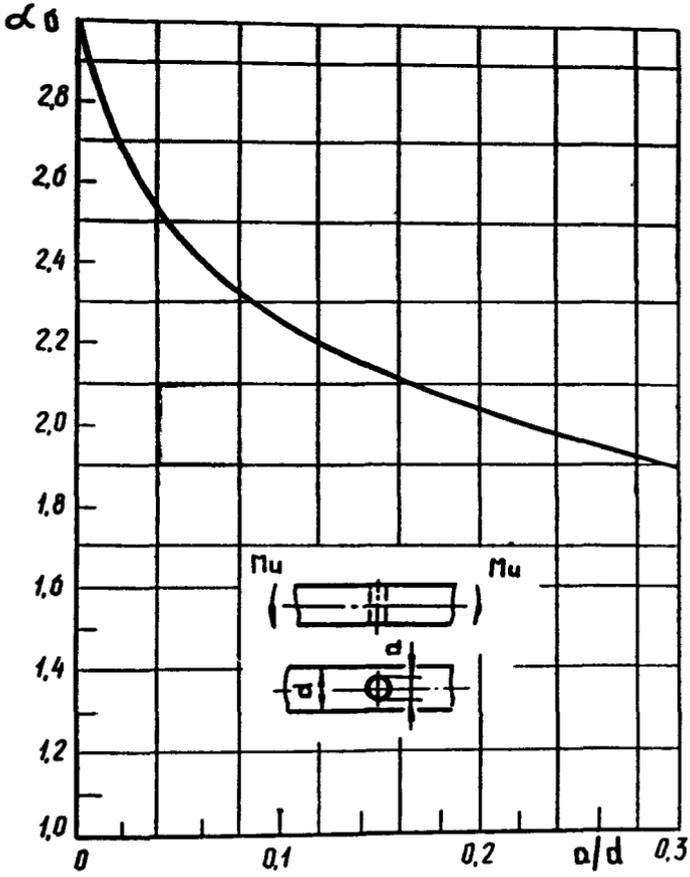


Рис. 35

Вал с поперечным отверстием при изгибе



$$\sigma_H = M_H / (\pi d^3 / 32 - a d^2 / 6)$$

Рис. 36

Схемы к определению параметра L

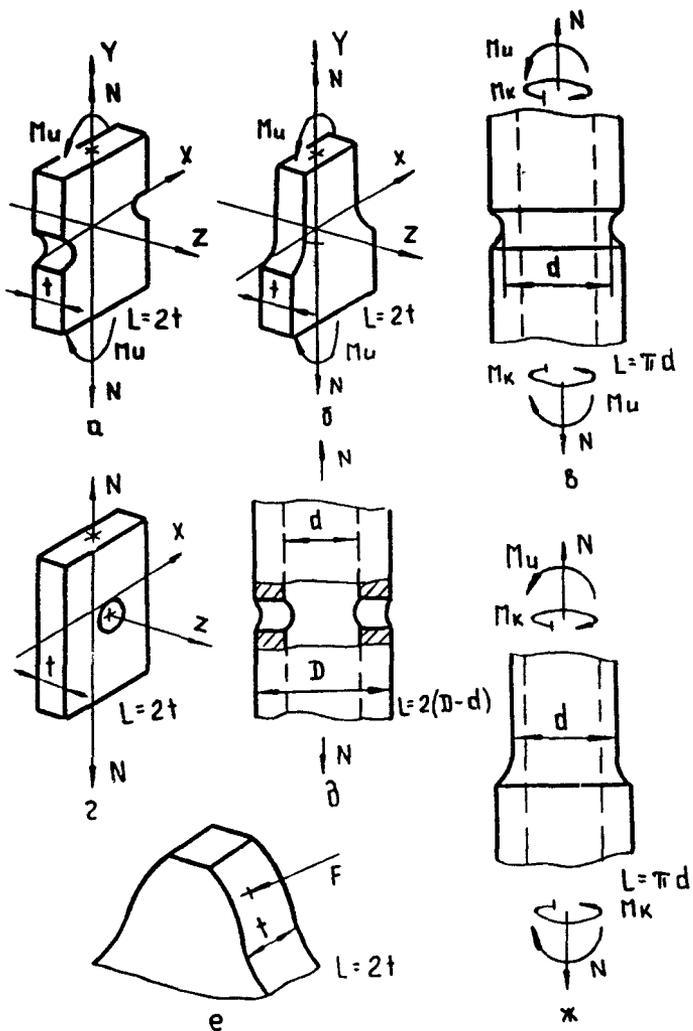


Рис 37

Значения коэффициента K_F

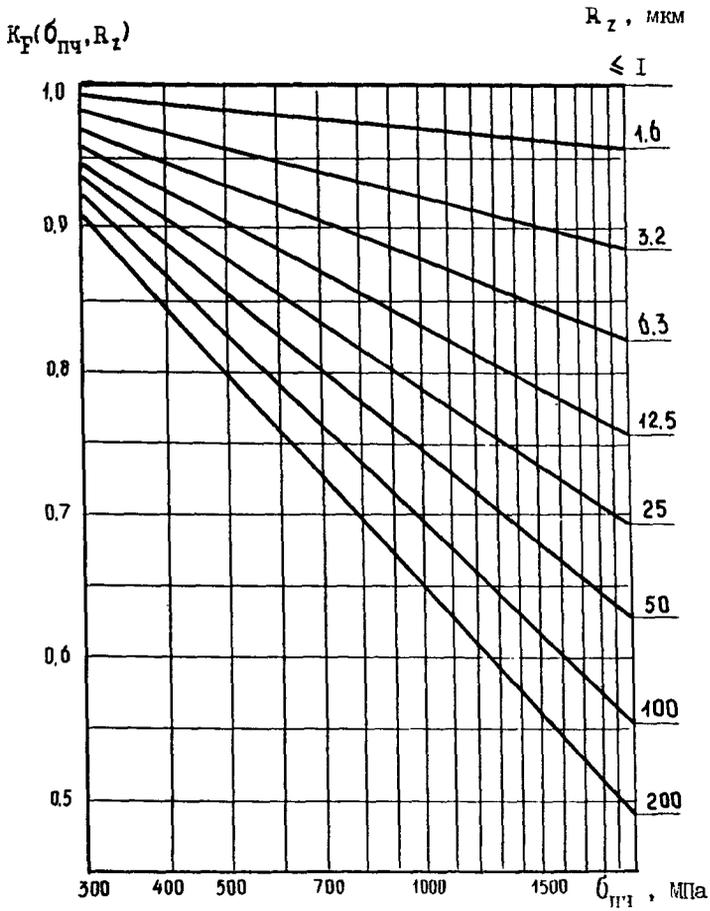
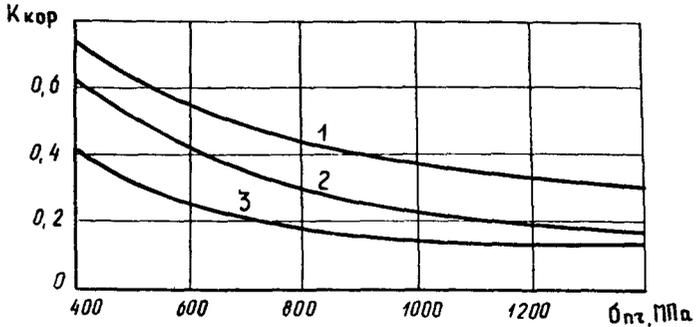


Рис. 38

Влияние коррозии в процессе испытания на предел выносливости стальных образцов при изгибе с вращением (осредненные кривые) на базе 10^7 циклов при частоте нагружения 30–50 Гц



- 1 – пресная вода (наличие концентрации напряжений);
 2 – пресная вода (отсутствие концентрации напряжений);
 3 – морская вода (отсутствие концентрации напряжений)

Рис. 39

Влияние коррозии до испытания на усталость на предел выносливости стальных образцов (при изгибе с вращением на базе 10^7 циклов при частоте нагружения 30–70 Гц)

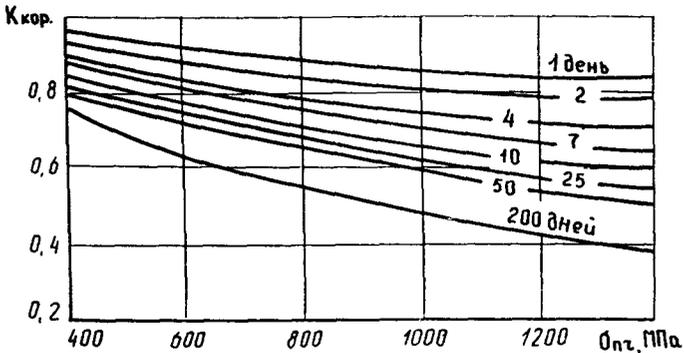


Рис 40

Т а б л и ц а 3

К О Э Ф Ф И Ц И Е Н Т Ы В Л И Я Н И Я
поверхностного упрочнения K_v

Тип обработки	Вид образца	Диаметр, мм	K_v
Закалка токами высокой частоты на глубину 0,9 - 1,5 мм	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,3 - 1,6 1,2 - 1,5
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,6 - 2,8 1,5 - 2,5
Азотирование на глубину 0,1-0,4 мм	Без концентрации	8 - 15 30 - 40	1,15 - 1,25 1,10 - 1,15
	С концентрацией	8 - 15 30 - 40	1,9 - 3,0 1,3 - 2,0
Цементация на глу- бину 0,2 - 0,6 мм	Без концентрации	8 - 15 30 - 40	1,2 - 2,1 1,1 - 1,5
	С концентрацией	8 - 15 30 - 40	1,5 - 2,5 1,2 - 2,0
Обкатка роликами	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,2 - 1,4 1,1 - 1,25
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,5 - 2,2 1,3 - 1,8
Обдувка дробью	Без концентрации	7 - 20 30 - 40	1,1 - 1,3 1,1 - 1,2
	С концентрацией	7 - 20 30 - 40	1,4 - 2,5 1,1 - 1,5

Относительный градиент напряжений

Д е т а л ь	В и д д е ф о р м а ц и и		
	И з г и б	Р а с т я ж е н и е и с ж а т и е	К р у ч е н и е
	σ , мм ⁻¹		σ_{τ} , мм ⁻¹
	$H / h > 1,5$	$2 / r$	—
	$2/r + 2/h$	$2 / r$	
	$H / h < 1,5$		
	$\frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{h}$	$\frac{2(1+\varphi)}{r}$	
	$D / d > 1,5$	$2 / r$	$\frac{1}{r} + \frac{2}{d}$
	$2/r + 2/d$	$2 / r$	
	$D / d < 1,5$		
	$\frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d}$	$\frac{2(1+\varphi)}{r}$	
	$H / h > 1,5$	$2,3 / r$	—
	$2,3/r + 2/h$	$2,3 / r$	
	$H / h < 1,5$		
	$\frac{2,3(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{h}$	$\frac{2,3(1+\varphi)}{r}$	
	$D / d > 1,5$	$2,3 / r$	$\frac{1,15}{r} + \frac{2}{d}$
	$2,3/r + 2/d$	$2,3 / r$	
	$D / d < 1,5$		
	$\frac{2,3(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d}$	$\frac{2,3(1+\varphi)}{r}$	
	—	$\frac{2,3}{r}$	—

П р и м е ч а н и е. Для случаев, указанных в таблице,
 $\varphi = 1/(2 + 4 \sqrt{t/r})$, где $t = 0,5(H-h)$ или $t = 0,5(D-d)$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТАМ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

Номограмма для расчета на устойчивость в пределах упругости цилиндрических обечаек, работающих под наружным давлением

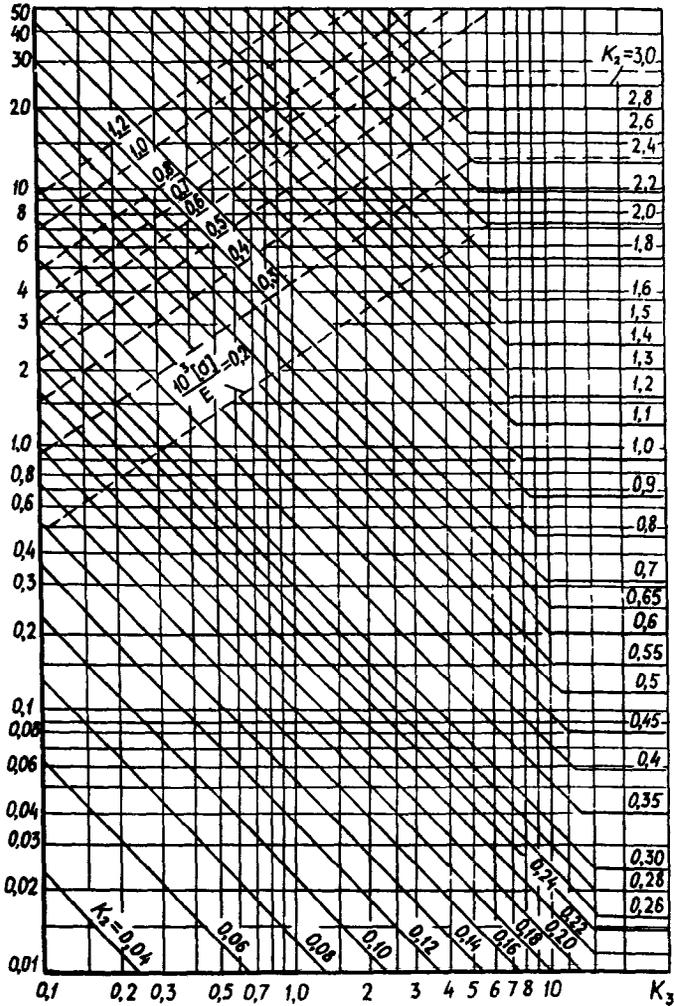
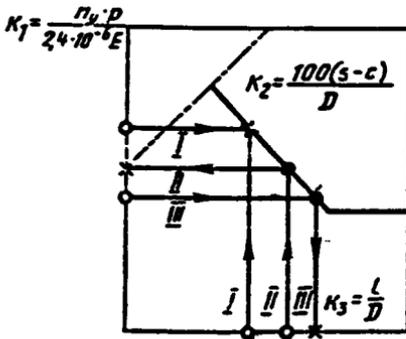


Рис. 41

Примеры использования номограммы (см. рис. 41)



- I - определение расчетной толщины стенки;
 II - определение допускаемого наружного давления;
 III - определение допускаемой расчетной длины

Рис. 42

Коэффициент приведения радиуса кривизны
 эллиптического днища

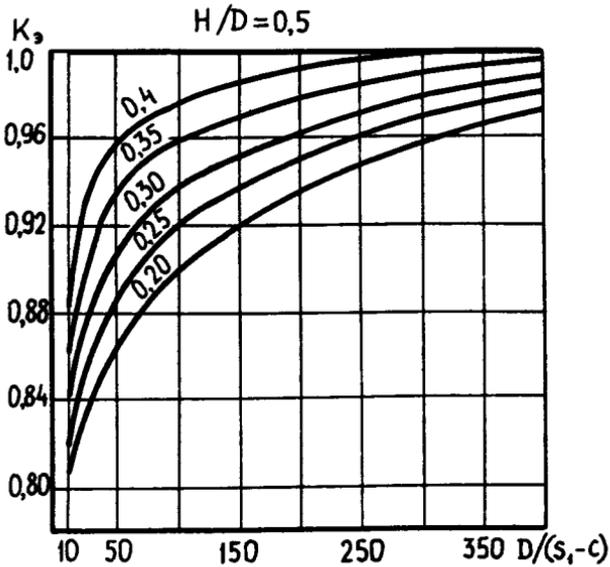
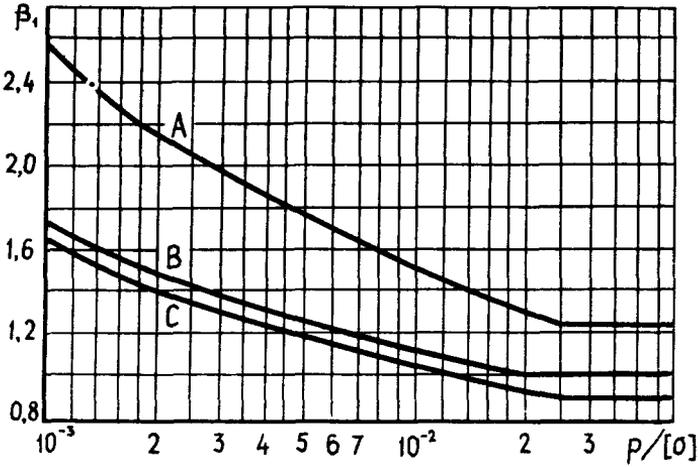


Рис. 43

Коэффициент формы β_1 

A - $R \approx D_1, r_1 \geq 0,095D_1$;

B - $R \approx 0,9D_1, r_1 \geq 0,170D_1$;

C - $R \approx 0,8D_1, r_1 \geq 0,150D_1$

Рис. 44

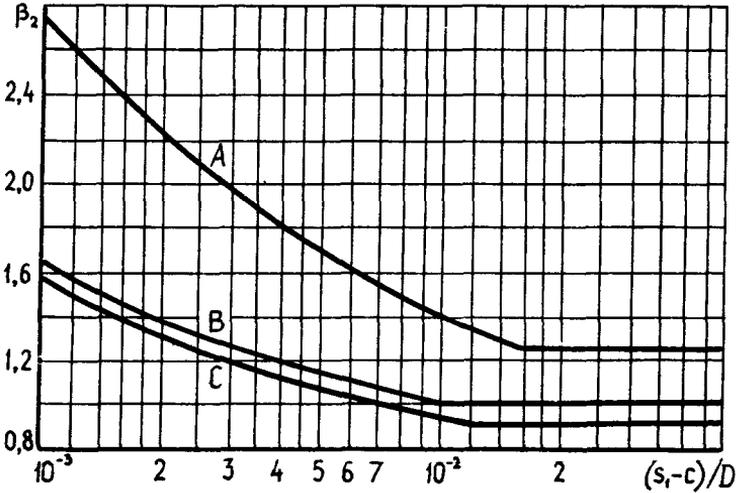
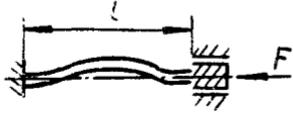
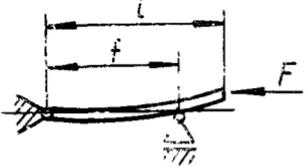
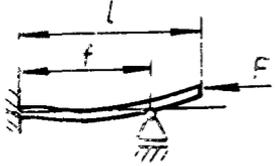
Коэффициент формы β_2 

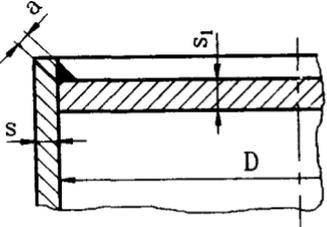
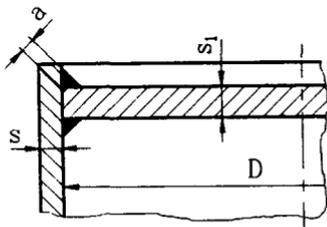
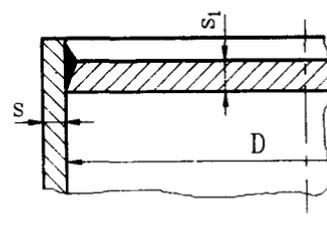
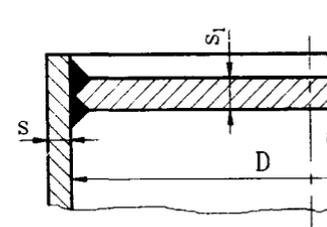
Рис. 45

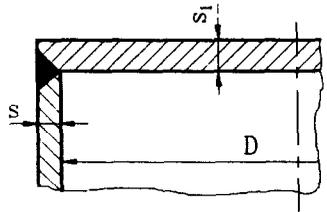
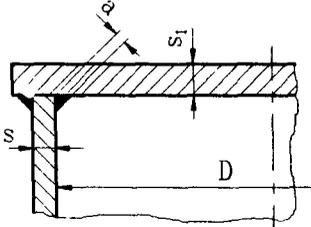
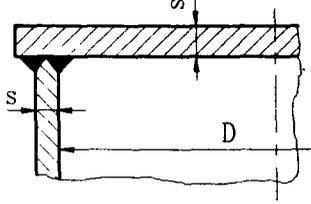
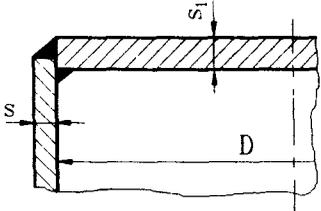
Таблица 1

Приведенная расчетная длина $l_{пр}$

Расчетная схема	$\frac{f}{l}$	$l_{пр}$
	—	l
	—	$2l$
	—	$0,7l$
	—	$0,5l$
	0	$2,00l$
	0,2	$1,72l$
	0,4	$1,47l$
	0,6	$1,23l$
	0,8	$1,03l$
	1,0	$1,00l$
	0	$2,00l$
	0,2	$1,70l$
	0,4	$1,40l$
	0,6	$1,11l$
	0,8	$0,85l$
	1,0	$0,70l$

Расчетные параметры для плоских круглых днищ (крышек)

Тип	Схема	Условия закрепления днищ и крышек	К
1		$a \geq 1,7s$ $D_p = D$	0,53
2		$a \geq 0,85s$ $D_p = D$	0,50
3		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,25$ $D_p = D$	0,45 0,41
4		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$	0,41 0,38

Тип	Схема	Условия закрепления днищ и крышек	К
5		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,25$ $D_p = D$	0,45 0,41
6		$a \geq 0,85s$ $D_p = D$	0,50
7		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$	0,41 0,38
8		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$	0,41 0,38

Тип	Схема	Условия закрепления днищ и крышек	К
9		$\max \{s; 0,25 s_1\} \leq r \leq \min \{s_1; 0,1D\}$ $h_1 \geq r$ $D_p = D - 2r$	$K = \max \left\{ 0,11 \cdot \left(1 - 0,23 \frac{s-c}{s_1-c} \right); 0,35 \right\}$
10		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$ $0,25s_1 \leq r \leq s_1 - s_2$ $30^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$	$0,41$ $0,38$
11		$D_p = D_3$	$0,40$
12		$D_p = D_{c.п}$	$0,11$

Таблица 3

**Допускаемые напряжения для углеродистых и
низколегированных сталей**

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа для сталей марок								
	ВСт3		09Г2С, 16ГС		20,20К		10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	толщина, мм								
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160				
20	154	140	196	183	147	130	180	183	
100	149	134	177	160	142	125	160	160	
150	145	131	171	154	139	122	154	154	
200	142	126	165	148	136	118	148	148	
250	131	120	162	145	132	112	145	145	
300	115	108	151	134	119	100	134	134	
350	105	98	140	123	106	88	123	123	
375	93	93	133	116	98	82	108	116	
400	85	85	122	105	92	77	92	105	
410	81	81	104	104	86	75	86	104	
420	75	75	92	92	80	72	80	92	
430	71*	71*	86	86	75	68	75	86	
440	-	-	78	78	67	60	67	78	
450	-	-	71	71	61	53	61	71	
460	-	-	64	64	55	47	55	64	
470	-	-	56	56	4	42	49	56	
480	-	-	53	53	46**	37	46**	53	

* Для расчетной температуры стенки 425°С.

** Для расчетной температуры стенки 475°С.

Примечания:

1. При расчетных температурах ниже 20°С допускаемые напряжения принимают такими же, как при 20°С, при условии допустимого применения материала при данной температуре.

2. Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемые напряжения определяют линейной интерполяцией с округлением результатов до 0,5 МПа в сторону меньшего значения.

Таблица 4

**Допускаемые напряжения
для теплоустойчивых хромистых сталей**

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147	147	155	146	240
100	146,5	146,5	153	141	235
150	146	146	152,5	138	230
200	145	145	152	134	225
250	145	145	152	127	220
300	141	141	147	120	210
350	137	137	142	114	200
375	135	135	140	110	180
400	132	132	137	105	170
410	130	130	136	103	160
420	129	129	135	101	150
430	127	127	134	99	140
440	126	126	132	96	135
450	124	124	131	94	130
460	122	122	127	91	126
470	117	117	122	89	122
480	114	114	117	86	118
490	105	105	107	83	114
500	96	96	99	79	108
510	82	82	84	72	97
520	69	69	74	66	85
530	60	57	67	60	72
540	50	47	57	54	58
550	41	-	49	47	52
560	33	-	41	40	45
570	-	-	-	35	40
580	-	-	-	30	34
590	-	-	-	28	30
600	-	-	-	25	25

Примечание. При расчетных температурах ниже 200°С сталь марок 12МХ, 12ХМ, 15ХМ применять не рекомендуется.

Таблица 5

Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	180	160	153	168	184
100	173	133	140	156	174
150	171	125	130	148	168
200	171	120	120	140	160
250	167	115	113	132	154
300	149	112	103	123	148
350	143	108	101	113	144
375	141	107	90	108	140
400	140	107	87	103	137
410	-	107	83	102	136
420	-	107	82	101	135
430	-	107	81	100,5	134
440	-	107	81	100	133
450	-	107	80	99	132
460	-	-	-	98	131
470	-	-	-	97,5	130
480	-	-	-	97	129
490	-	-	-	96	128
500	-	-	-	95	127
510	-	-	-	94	126
520	-	-	-	79	125
530	-	-	-	79	124
540	-	-	-	78	111
550	-	-	-	76	111
560	-	-	-	73	101
570	-	-	-	69	97
580	-	-	-	65	90
590	-	-	-	61	81
600	-	-	-	57	74
610	-	-	-	-	68
620	-	-	-	-	62
630	-	-	-	-	57
640	-	-	-	-	52
650	-	-	-	-	48
660	-	-	-	-	45
670	-	-	-	-	42
680	-	-	-	-	38
690	-	-	-	-	34
700	-	-	-	-	30

Таблица 6

Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенито-ферритного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа, для сталей марок					
	08X18Г-8Н2Т (КО-3)	07X13АГ20 (ЧС-46)	02X8Н22С6 (ЭП-794)	15X18Н12-С4ТЮ (ЭИ-654)	06XН28МДТ 03XН28МДТ	08X22Н6Т, 08X21Н6М2Т
20	230	233	133	233	147	233
100	206	173	106,5	220	138	200
150	190	153	100	206,5	130	193
200	175	133	90	200	124	188,5
250	160	127	83	186,5	117	166,5
300	144	120	76,5	180	110	160
350	-	113	-	-	107	-
375	-	110	-	-	105	-
400	-	107	-	-	103	-

Таблица 7

Модуль продольной упругости

Стали	Модуль продольной упругости $E \cdot 10^{-5}$, МПа, при температуре, °С													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Углеродистые и низколегированные	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	-	-	-	-	
Теплоустойчивые и коррозионностойкие хромистые	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	-	-
Жаропрочные и жаростойкие аустенитные	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32

Таблица 8

Коэффициенты прочности сварных швов

Вид сварного шва	Значение коэффициентов прочности сварных швов	
	Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100 %	Длина контролируемых швов от общей длины составляет от 10 до 50 %
Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый вручную	1,0	0,9
Стыковой, доступный сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металл ескую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу	0,9	0,8
В гавр, с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65
Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65

СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО МАТЕМАТИКЕ

1. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТАХ

1.1. *Значащие цифры числа.*

Значащими цифрами числа называются все его цифры, кроме нулей, стоящих левее первой, отличной от нуля цифры, и нулей, стоящих в конце числа, если они взяты взамен неизвестных или отброшенных цифр.

Примеры:

а) $0,006304000$
 незначащие значащая

б) $8030000 = 803 \cdot 10^4$
 значащая незначащие

1.2. *Правила округления:*

а) Если первая отбрасываемая цифра больше 4, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу.

Например, при округлении до сотых $46,2872 \approx 46,29$.

б) Если первая отбрасываемая цифра меньше 4 или равна 4, то последняя сохраняемая цифра не изменяется.

Например, при округлении до сотых $13,924 \approx 13,92$.

в) Если отбрасываемая часть числа состоит из одной цифры 5, то число округляется так, чтобы последняя сохраняемая цифра была четной.

Например, при округлении до десятых:

$$43,25 = 43,2;$$

$$43,35 = 43,4.$$

1.3. *Математические действия с приближенными числами - правила подсчета цифр:*

а) При сложении и вычитании в результате сохраняют столько десятичных знаков, сколько их содержится в числе с наименьшим количеством десятичных знаков.

Пример. $274,1 + 87,43 \approx 361,5$.

б) При умножении и делении в результате сохраняют столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное число с наименьшим количеством значащих цифр (без нулей).

Примеры: а) $3,2 \cdot 12,56 = 40,192 \approx 40,2$;

$$\text{б) } \frac{243,25}{11,2} \approx 21,7.$$

в) Результат расчета значений функций x^n ; $\sqrt[n]{x}$; $\lg x$ некоторого приближенного числа x должен содержать столько значащих цифр, сколько их имеет число.

Примеры: а) $3,14^2 = 9,8696 \approx 9,87$; б) $\sqrt{31} = 5,4772 \approx 5,5$.

г) Если некоторые приближенные числа имеют больше десятичных знаков (при сложении или вычитании) или больше значащих цифр (при умножении, делении, возведении в степень, извлечении корня), чем другие, то их предварительно следует округлять, сохраняя только одну лишнюю цифру.

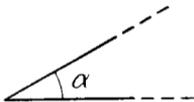
Примеры: а) $103,7 - 21,3385 \approx 103,7 - 21,34 \approx 82,4$;

$$\text{б) } 1,2 \cdot 37,82 \cdot 27,425 \approx 1,2 \cdot 37,8 \cdot 27,4 \approx 1,2 \cdot 10^3.$$

2. УГЛЫ. УГЛОВЫЕ МЕРЫ

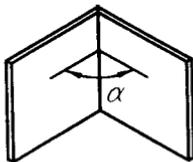
2.1. Углы

а)



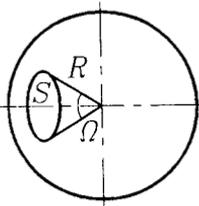
Плоский угол - часть плоскости, ограниченная двумя полупрямыми, исходящими из одной точки.

б)



Двугранный угол - часть пространства, ограниченная двумя пересекающимися полуплоскостями; линия их пересечения - ребро.

в)



Пространственный, или телесный, угол Ω - часть пространства, ограниченная конической поверхностью.

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

Единицей измерения телесного угла является 1 ср (стерадиан)- телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на ней часть, площадь которой равна квадрату ее радиуса.

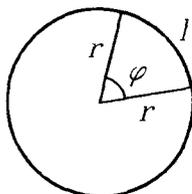
2.2. Угловые меры

Углы выражаются в градусных и дуговых мерах.

а) градусные меры.

Единицей служит градус (1°), то есть $1/90$ часть прямого угла. В соответствии с этим полная окружность содержит 360° ;

б) дуговая мера.



Единицей служит 1 радиан (рад) - центральный угол, длина дуги которого равна радиусу, т.е. если $l=r$, то $\varphi = 1$ рад.

2.3. Переход из градусной меры в радианную, и наоборот:

$$\text{а) } 1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ рад} = 0,0175 \text{ рад}$$

Угол α в радианах равен числу $0,0175$, умноженному на угол в градусах.

Например, угол $\alpha=20^\circ$, выраженный в радианах, равен

$$0,0175 \cdot 20^\circ = 0,35 \text{ рад};$$

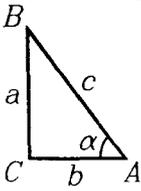
$$\text{б) } 1 \text{ рад} = \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57^\circ 18' 45''$$

Угол α в градусах равен числу 57 , умноженному на угол в радианах

Например, угол $\alpha=1,5$ рад, выраженный в градусах, равен

$$57 \cdot 1,5 \text{ рад} = 85,5^\circ.$$

3. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ УГЛА



Основные тригонометрические функции:

синус \sin ; косинус \cos ; тангенс tg ; котангенс ctg .
 c - гипотенуза; a, b - катеты.

$\sin \alpha = \frac{a}{c}$
$\cos \alpha = \frac{b}{c}$
$tg \alpha = \frac{a}{b}$
$ctg \alpha = \frac{b}{a}$

Функции	Углы					
	0°	30°	45°	60°	90°	180°
$\sin \alpha$	0	0,5	$\frac{\sqrt{2}}{2} = 0,71$	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87$	1	0
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87$	$\frac{\sqrt{2}}{2} = 0,71$	0,5	0	1
$tg \alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} = 0,58$	1	$\sqrt{3} = 1,73$	-	0
$ctg \alpha$	-	$\sqrt{3} = 1,73$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3} = 0,58$	0	-

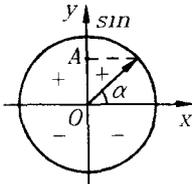
Если угол больше 90°, но меньше 360°, то его тригонометрические функции определяются следующим образом:

находится разность между данным углом и ближайшим к нему из углов 180° и 360°, затем вычисляется нужная функция от этой разницы, а перед результатом ставится знак "+" или "-".

Примеры: $\sin 300^\circ = -\sin 60^\circ$ (т.к. $360^\circ - 300^\circ = 60^\circ$); IV четверть
 $\cos 145^\circ = -\cos 35^\circ$ (т.к. $180^\circ - 145^\circ = 35^\circ$); II четверть
 $tg 230^\circ = +tg 50^\circ$ (т.к. $230^\circ - 180^\circ = 50^\circ$); III четверть

Линии \sin ; \cos ; tg ; ctg для отсчета углов и их знаки в различных четвертях окружности:

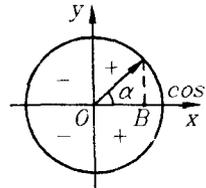
3.1.



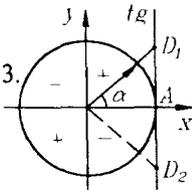
Линия $\sin \alpha$ есть проекция OA подвижного радиуса на вертикальный диаметр (в соответствии со знаком).

3.2.

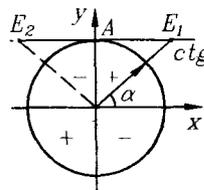
Линия $\cos \alpha$ есть проекция OB подвижного радиуса на горизонтальный диаметр.



3.3.



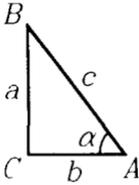
D_1, AD_2 - линия тангенса



E_1, AE_2 - линия котангенса

4. СООТНОШЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ И ПРОИЗВОЛЬНОМ ТРЕУГОЛЬНИКАХ

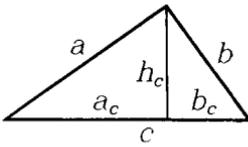
Свойства прямоугольного треугольника



$a = c \sin \alpha$	$a = b \operatorname{tg} \alpha$
$b = c \cos \alpha$	$b = a \operatorname{ctg} \alpha$

$$\boxed{c^2 = a^2 + b^2} \text{ - теорема Пифагора}$$

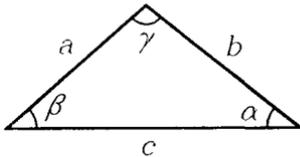
a, b - катеты; c - гипотенуза; α - угол между сторонами b, c .



$$a_c : a = a : c; \quad b_c : b = b : c; \quad b_c : h_c = h_c : a_c,$$

где a_c, b_c - проекции катетов a, b на гипотенузу c .

Соотношения в произвольном треугольнике



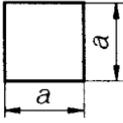
a, b, c - стороны треугольника
 α, β, γ - углы треугольника

$$\boxed{\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}} \text{ - теорема синуса}$$

$$\boxed{\begin{aligned} a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \\ b^2 &= a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta \\ c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma \end{aligned}} \text{ - теорема косинуса}$$

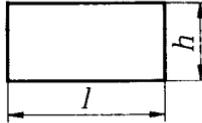
5. ПЛОЩАДИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФИГУР

1. Квадрат



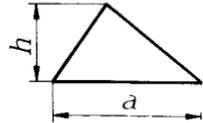
$$S = a^2$$

2. Прямоугольник

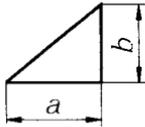


$$S = lh$$

3. Треугольник

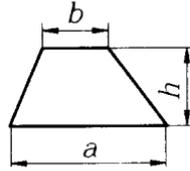


$$S = \frac{ah}{2}$$

4. Прямоугольный
треугольник

$$S = \frac{ab}{2}$$

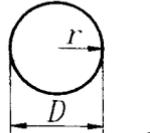
5. Трапеция



$$S = \frac{(a+b)h}{2}$$

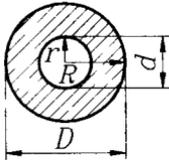
 $l = 2\pi r$ - длина окружности

6. Окружность и круг



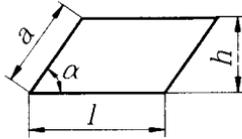
$$S = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

7. Кольцо



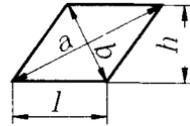
$$S = \pi(R^2 - r^2) = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}$$

8. Параллелограмм



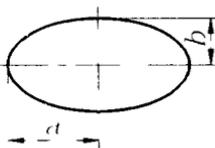
$$S = lh = a l \sin \alpha$$

9. Ромб



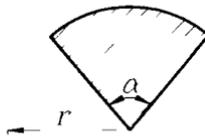
$$S = lh = \frac{ab}{2}$$

10. Эллипс



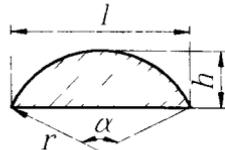
$$S = \pi ab$$

11. Сектор



$$S = \frac{\pi r^2 \alpha^\circ}{360^\circ}$$

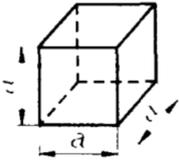
12. Сегмент



$$S = \frac{\pi r^2 \alpha^\circ}{360^\circ} - \frac{l(r-h)}{2}$$

6. ПОВЕРХНОСТИ И ОБЪЕМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЛ

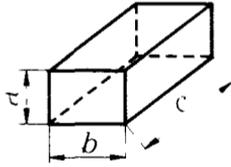
1. Куб



$$S = 6a^2$$

$$V = a^3$$

2. Параллелепипед



$$S = 2(ab + ac + bc)$$

$$V = abc$$

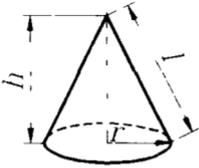
3. Шар



$$S = 4\pi R^2 = \pi D^2$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

4. Конус

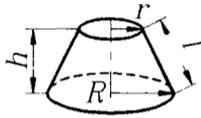


$$S_{\text{бок}} = \pi r l$$

$$S_{\text{пол}} = \pi r(l + r)$$

$$V = \frac{\pi r^2 h}{3}$$

5. Усеченный конус

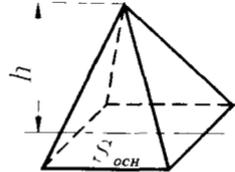


$$S_{\text{бок}} = \pi l(R + r)$$

$$S_{\text{пол}} = \pi [R^2 + r^2 + l(R + r)]$$

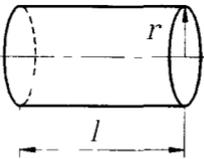
$$V = \frac{\pi h}{3}(R^2 + r^2 + Rr)$$

6. Пирамида



$$V = \frac{S_{\text{осн}} \cdot h}{3}$$

7. Цилиндр

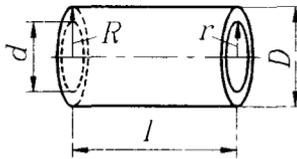


$$S_{\text{бок}} = 2\pi r l$$

$$S_{\text{пол}} = 2\pi r(l + r)$$

$$V = \pi r^2 l$$

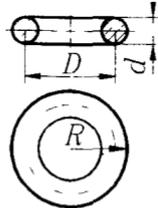
8. Полый цилиндр (труба)



$$V = \pi l(R^2 - r^2) =$$

$$= \frac{\pi l}{4}(D^2 - d^2)$$

9. Тор



$$S = 4\pi^2 Rr$$

$$V = \frac{\pi^2 D d^2}{4} = 2\pi^2 Rr^2$$

7. ПРОЦЕНТЫ

Процентом числа называется сотая часть этого числа.

7.1 Нахождение процента данного числа

Чтобы найти процент a от числа A , нужно умножить его на число процентов p и разделить на 100 , т.е. $a = \frac{A \cdot p}{100}$.

7.2 Нахождение числа по данным процентам

Чтобы найти число A по данной величине a его процента p , следует разделить число a на число процентов p и умножить на 100 ,

$$\text{т.е. } A = \frac{a}{p} \cdot 100$$

7.3 Процентное отношение двух чисел

При нахождении процентного отношения числа b к числу c необходимо вычислить отношение $\frac{b}{c}$ и умножить на 100 .

8 ЛОГАРИФМЫ

8.1 Логарифмом числа $N > 0$ по основанию $a > 0$ называется показатель степени x , в которую нужно возвести основание a , чтобы получить число N , т.е.

$$x = \log_a N, \text{ то } a^x = N \text{ или } a^{\log_a N} = N$$

Пример: $\log_2 0,25 = -2$, так как $2^{-2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4} = 0,25$

Основные свойства логарифмов (при $a > 0$; $a \neq 1$; $b > 0$; $c > 0$)

$$1 \quad \log_a(bc) = \log_a b + \log_a c \qquad 4 \quad \log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}; c \neq 1$$

$$2 \quad \log_a \frac{b}{c} = \log_a b - \log_a c \qquad 5 \quad \log_a \frac{1}{b} = -\frac{1}{\log_b a}; b \neq 1$$

$$3 \quad \log_a b^q = q \log_a b$$

8.2 В практических расчетах употребляют логарифмы с основанием, равным 10 , которые называются десятичными логарифмами.

$$\log_{10} N = \lg N$$

8.3 В теории приняты натуральные логарифмы. Основанием натуральных логарифмов является число $e = 2,71828\dots$ Логарифмы обозначаются знаком \ln

Переход от натуральных логарифмов к десятичным совершается по формулам

$$\lg N = 0,43429 \ln N, \quad \ln N = 2,30 \lg N.$$

9. ПРОИЗВОДНЫЕ

Основные свойства производных

Если $u(x)$ и $v(x)$ - дифференцируемые функции в точке x_0 , то в этой точке:

$$(c \cdot u)' = c \cdot u' \quad (c = \text{const});$$

$$(u \pm v)' = u' \pm v';$$

$$(uv)' = u'v + uv';$$

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2} \quad (v(x_0) \neq 0).$$

Производные от элементарных функций

$$(x^k)' = k \cdot x^{k-1} \quad (k = \text{const});$$

$$(\sin x)' = \cos x;$$

$$(\cos x)' = -\sin x;$$

$$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x};$$

$$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x};$$

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}};$$

$$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}};$$

$$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2};$$

$$(\operatorname{arcctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2};$$

$$(a^x)' = a^x \ln a;$$

$$(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a};$$

$$(x^x)' = x^x (\ln x + 1);$$

$$(\operatorname{sh} x)' = \operatorname{ch} x;$$

$$(\operatorname{ch} x)' = \operatorname{sh} x;$$

$$(\operatorname{th} x)' = \frac{1}{\operatorname{ch}^2 x};$$

$$(\operatorname{cth} x)' = -\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$$

10. НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ОТ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЙ

$$\int x^k dx = \frac{x^{k+1}}{k+1} + C \quad (k \neq -1); \quad \int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C;$$

(постоянную C далее опускаем)

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a};$$

$$\int \sin x dx = -\cos x;$$

$$\int \cos x dx = \sin x;$$

$$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln|\cos x|;$$

$$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln|\sin x|;$$

$$\int \operatorname{sh} x dx = \operatorname{ch} x;$$

$$\int \operatorname{ch} x dx = \operatorname{sh} x;$$

$$\int \operatorname{th} x dx = \ln \operatorname{ch} x$$

$$\int \operatorname{cth} x dx = \ln|\operatorname{sh} x|;$$

$$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \left| \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right|;$$

$$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|;$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{sh} x} = \ln \left| \operatorname{th} \frac{x}{2} \right|;$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{ch} x} = 2 \operatorname{arctg} e^x;$$

$$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x;$$

$$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x;$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{sh}^2 x} = -\operatorname{cth} x;$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{ch}^2 x} = \operatorname{th} x;$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} \quad (a \neq 0);$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| \quad (a \neq 0);$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \operatorname{arcsin} \frac{x}{a} \quad (|x| < a);$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm a^2}} = \ln \left| x + \sqrt{x^2 \pm a^2} \right| \quad (a \neq 0).$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Алексеев Г.М., Мазовер И.С. Справочник конструктора-машиностроителя. - Л.: Судпромгиз, 1957.
2. Анурьев В.И. и др. Справочник конструктора-машиностроителя. Т.1. - М.: Машиностроение, 1982. - 736 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - 13-е изд., исправленное. - М.: Наука, 1986. - 544 с.
4. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. - Введ. 01.01.90. - 79 с. Группа Г02.
5. ГОСТ 2.105-79. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. - Введ. 01.07.80.- 23 с. Группа Т52.
6. ГОСТ 2.319-81. Правила выполнения диаграмм.- Введ. 01.01.83. - 10 с. Группа Т52.
7. ГОСТ 7.1-76. СИБД. Библиографическое описание произведений печати. - Введ. 01.01.78. - 62 с. Группа Т62.
8. ГОСТ 8.417-81. ГСОЕИ. Единицы физических величин. - Введ. 01.01.82. - 40 с. Группа Т80.
9. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 80 с. - Введ. 01.07.83. Группа Т59.
10. Единая система конструкторской документации. Основные положения: Сб. стандартов. - М.: Изд-во стандартов. 1982. -352 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1973. - 832 с.
12. Курсовое проектирование деталей машин / Под ред. В.Н. Кудрявцева. - Л.: Машиностроение, 1983. - 400 с.
13. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1980. - 492 с.

14. Лашинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1981. - 383 с.
15. Левин И.А. Справочник конструктора точных приборов. - М.: Машиностроение, 1966.
16. Мягков В.Д. Справочник конструктора. - Л.: Машгиз, 1963.
17. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 1 - 3. - М.: Машгиз, 1956. - 884 с.; 1958. - 974 с.; 1959. - 1118 с.
18. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в трех томах, том 1 / Под общ. ред. И.А.Биргера и Я.Г.Пановко. - М.: Машиностроение, 1968. - 832 с.
19. Рахмилевич З.З., Радзин И.М., Фармазов С.А. Справочник механика химических и нефтехимических производств. - М.: Химия, 1985. - 591 с.
20. Сальников Г.П. Краткий справочник машиностроителя. - Киев: ГИТЛ УССР 1963.
21. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие / Под ред. С.В.Серенсена. - М.: Машиностроение, 1975. - 488 с.
22. Стандарт предприятия. Рукопись авторская для внутривозовского издания. Общие требования и правила оформления. СТП 1 00-81. - Уфа: Изд-во Уфимск. нефт. ин-та, 1983. - 60 с. - Введ. 01.09.82. Группа Т63.
23. Чернох С. Справочник по машиностроению. Перевод с чешского. Т. 1-2. - М.: Машиностроение, 1964.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ	4
1 Внутренние силовые факторы и основные виды нагружения	4
2 Центральное растяжение и сжатие прямолинейного стержня	5
3 Теория напряженного состояния	6
4 Гипотезы прочности	7
5 Кручение круглых валов	8
6 Геометрические характеристики плоских сечений	9
7 Плоский прямой изгиб	10
7 1 Определение напряжений и расчет на прочность	10
7 2 Определение перемещений и расчет на жесткость	11
8 Силовые и геометрические параметры некоторых балок	12
9 Статически неопределимые системы	13
10 Сложное сопротивление	14
10 1 Косой изгиб	14
10 2 Изгиб с кручением	14
10 3 Внецентренное продольное нагружение	15
11 Устойчивость деформируемых систем	16
11 1 Продольный изгиб	16
11 2 Продольно-поперечный изгиб	16
11 3 Устойчивость труб	16
12 Динамическое нагружение	17
12 1 Учет сил инерции	17
12 2 Действие удара на конструкцию	17
12 3 Колебания упругих систем с одной степенью свободы	17
13 Плоские кривые стержни	18
14 Переменные напряжения	19
15 Тонкостенные сосуды	20
16 Толстостенные трубы	21
17 Базовые элементы сосудов и аппаратов	22
17 1 Гладкие цилиндрические обечайки	23
17 2 Гладкие конические обечайки	26
17 3 Выпуклые днища	27
17 4 Плоские круглые днища и крышки	29

ПРИЛОЖЕНИЯ	СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ	31
Приложение 1	Новый стандарт ИСО "Обозначения и основные символы"	32
Приложение 2	Нормальные линейные размеры по ГОСТ 6636	38
Приложение 3	Кратные и дольные единицы системы СИ	38
Приложение 4	Сортамент прокатной стали	39
Таблица 1	Сталь горячекатанная Балки двутавровые	39
Таблица 2	Сталь горячекатанная Швеллеры с уклоном внутренних граней полок	41
Таблица 3	Сталь прокатная угловая равнополочная	43
Таблица 4	Сталь прокатная угловая неравнополочная	49
Приложение 5	Основные расчетные характеристики наиболее употребительных материалов	53
Приложение 6	Данные по расчету на кручение стержней прямоугольного сечения	53
Приложение 7	Механические характеристики конструкционных материалов	54
Приложение 8	Механические свойства и допускаемые напряжения конструкционных сталей	55
Таблица 1	Качественные углеродистые стали	55
Таблица 2	Легированные стали	57
Приложение 9	Данные к расчетам на устойчивость	60
Таблица 1	Коэффициенты продольного изгиба	60
Таблица 2	Значения коэффициентов, входящих в эмпирическую формулу Тетмайера-Ясинского для критической силы, и пределы применимости этой формулы	60
Приложение 10	Справочные данные к расчетам на выносливость	61
Приложение 11	Справочные данные к расчетам базовых элементов сосудов и аппаратов	89
Приложение 12	Справочные сведения по математике	101
ЛИТЕРАТУРА		111

Гафаров Радик Хайдарович
Шарафиев Роберт Гарафиевич
Ризванов Риф Гарифович

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ИНЖЕНЕРА-МЕХАНИКА

Редактор Маркешина Л.А.

Лицензия ЛР N 020267 от 12.11.91.

Подписано к печати 04.09.95. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Уч.-изд. листов 6,3.

Печ. листов 7,1. Тираж 2000 экз. Заказ 579 Артикул С139.

Отпечатано в БашНИИстрое. Уфа-64. ул.Конституции,3