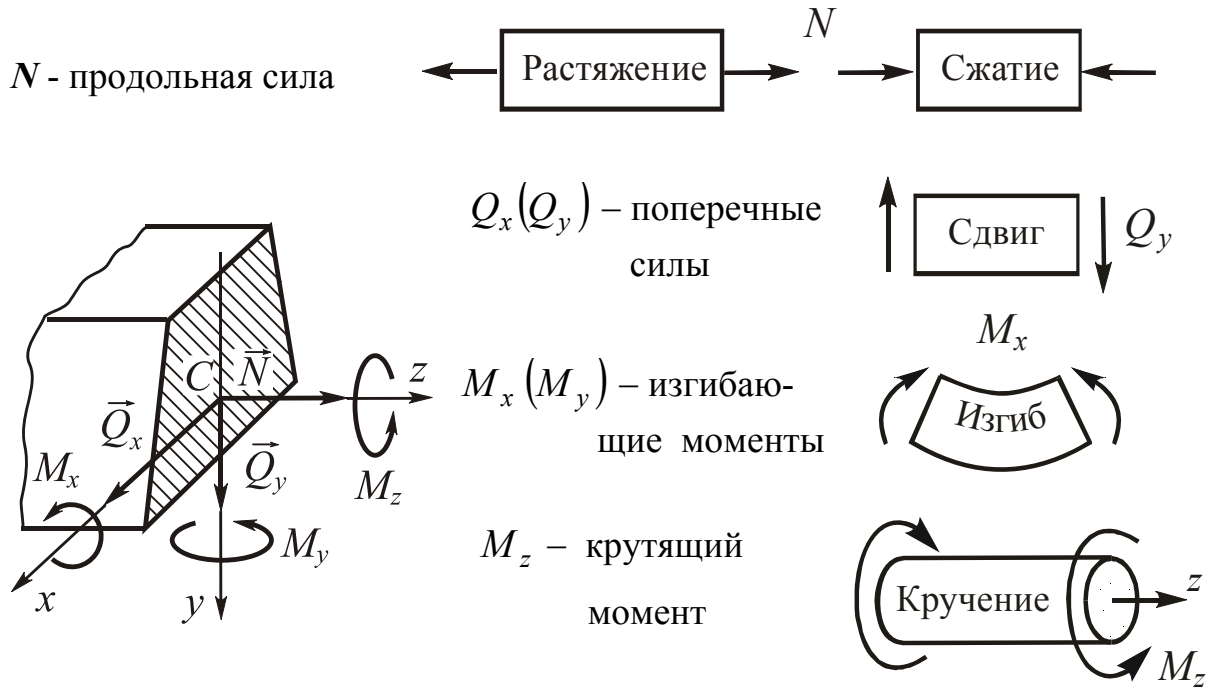
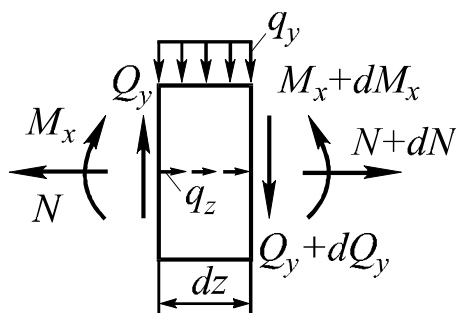


ГЛАВНЕЙШИЕ ФОРМУЛЫ

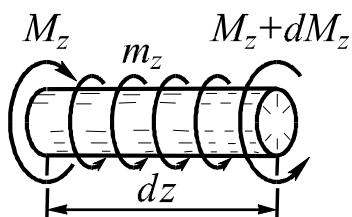
1. ВНУТРЕННИЕ СИЛОВЫЕ ФАКТОРЫ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАГРУЖЕНИЯ



Дифференциальные зависимости



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



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

Интегральные зависимости

$$N = N_o - \int_0^z q_z dz, \quad Q_y = Q_o - \int_0^z q_y dz, \quad M_z = M_o - \int_0^z m_z dz,$$

$$M_x = M_o + \int_0^z Q_y dz = M_o + \omega_Q.$$

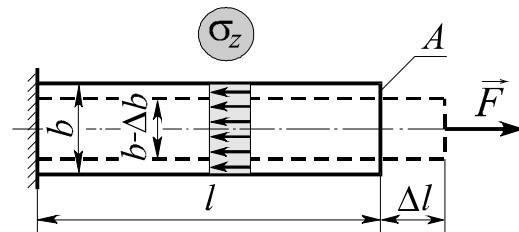
Частные случаи

| $q_z(q_y) = \pm q, \quad m_z = \pm m$ | $q_z(q_y) = 0, \quad m_z = 0$ |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| $N = N_o \pm qz$ | $N = N_o = \text{const}$ |
| $Q_y = Q_o \pm qz$ | $Q_y = Q_o = \text{const}$ |
| $M_z = M_o \pm mz$ | $M_z = M_o = \text{const}$ |
| $M_x = M_o + Q_o z \pm 0,5 qz^2$ | $M_x = M_o + Q_o z$ |

2. ЦЕНТРАЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЯ

Распределение нормальных напряжений

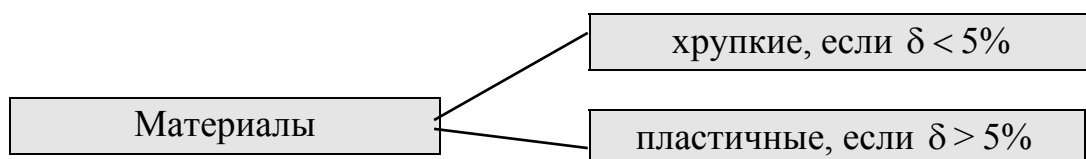
$$\sigma_z = N/A$$



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

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

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



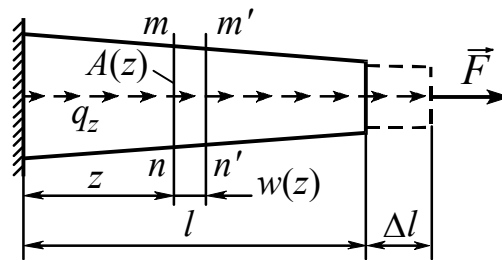
Нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$ равен: для пластичных высокооднородных материалов (сталь, сплавы алюминия, титана, магния и меди) – 1,5...2,5; для чугуна – 4...6; для дерева – 8...10.

Ориентировочные значения допускаемых напряжений на растяжение, 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 $\varepsilon = \Delta l/l$,

- поперечная $\varepsilon' = \Delta b/b$.



Закон Пуассона $\varepsilon' = -\nu\varepsilon$.

Коэффициент Пуассона лежит в пределах $0 \leq \nu \leq 0,5$

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

Закон Гука

$$\sigma = E\varepsilon$$

где E - модуль Юнга.

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

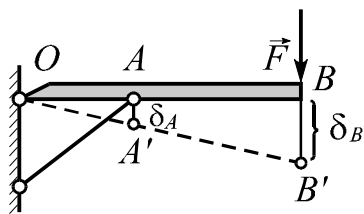
Удлинение стержня

$$\Delta l = \int_0^l \frac{N dz}{EA(z)}$$

В частном случае, когда

$N = F = \text{const}$ и $EA = \text{const}$,

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}$$



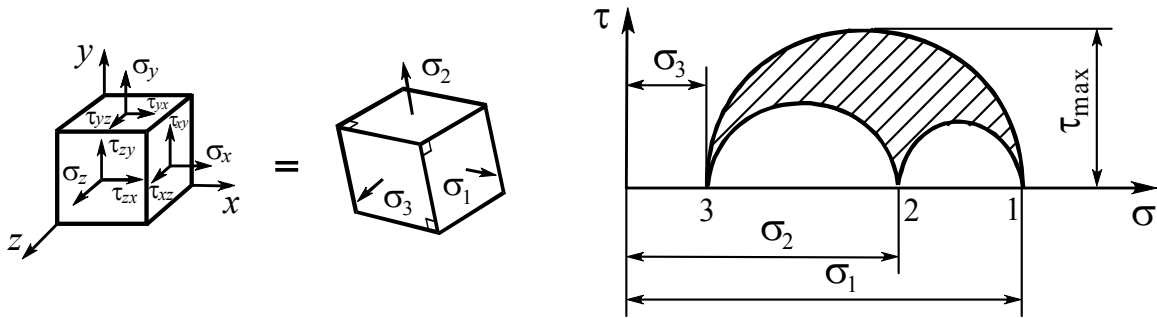
Условие жесткости

$$\delta \leq [\delta]$$

Потенциальная энергия упругой деформации

$$U = \int_0^l \frac{N^2 dz}{2EA}$$

3. ТЕОРИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ



$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad \begin{aligned} \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \\ \tau_{\max} &= 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \end{aligned}$$

Закон парности касательных напряжений

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

Обобщенный закон Гука

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

Относительное изменение объема: $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \sigma / K,$

где $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3,$ $K = E / 3(1 - 2\nu)$ - модуль объемной упругости.

Удельная потенциальная энергия упругой деформации:

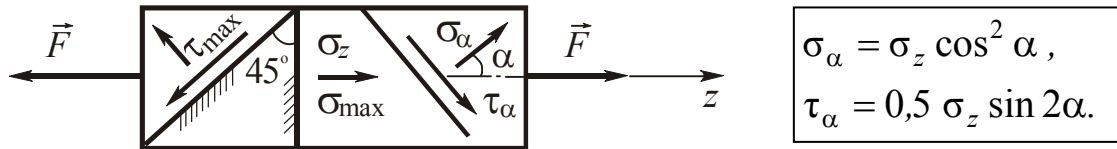
- полная $u = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] / (2E);$

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

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

3.1. Линейное напряженное состояние

(два главных напряжения равны нулю)

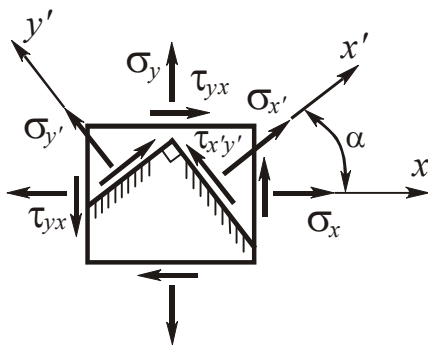


Наибольшее нормальное напряжение: $\sigma_{\max} = \sigma_{\alpha / \alpha=0} = \sigma_z$.

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)

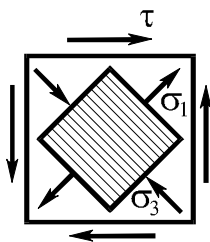


$$\begin{cases} \sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \tau_{x'y'} = -0,5(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha, \end{cases}$$

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

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

Чистый сдвиг:

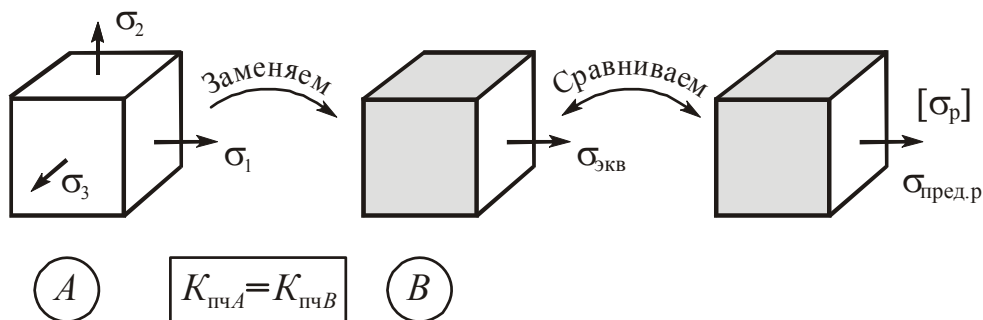


$$\sigma_x = \sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = \tau, \quad \sigma_{\max} = \pm \tau.$$

Главные напряжения

$$\sigma_1 = +\tau, \quad \sigma_2 = 0, \quad \sigma_3 = -\tau, \quad \alpha_1 = \pm 45^\circ.$$

4. ГИПОТЕЗЫ ПРОЧНОСТИ



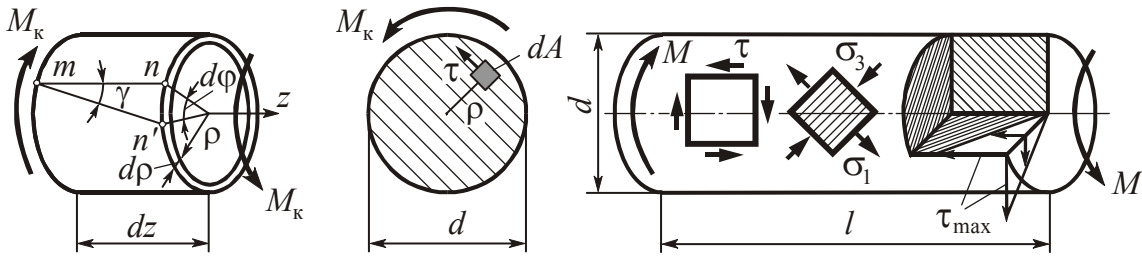
Они используются для оценки прочности конструкций в случае плоского и объемного напряженных состояний. Исходя из принятого критерия эквивалентности, лежащего в основе той или иной гипотезы прочности (см. таблицу, приведенную ниже), сложное напряженное состояние заменяют эквивалентным ему растяжением.

Условие прочности представляется в виде одного из следующих неравенств:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma_p] = \sigma_{\text{пред.р}} / [n] \quad \text{или} \quad n = \sigma_{\text{пред.р}} / \sigma_{\text{экв}} \geq [n].$$

| Название гипотезы, автор | Критерий прочности | Эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$ | Область применения |
|---|----------------------------|--|--|
| Наибольших нормальных напряжений (Галилей, XVII в.) | σ_{max} | σ_1 | Не рекомендуется |
| Наибольших линейных деформаций (Мариотт, 1682 г.) | ε_{max} | $\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$ | Не рекомендуется |
| Наибольших касательных напряжений (Кулон, 1773 г.) | τ_{max} | $\sigma_1 - \sigma_3$ | Для пластичных материалов, у которых $\sigma_{\text{тр}} = \sigma_{\text{тс}}$ |
| Энергии формоизменения (Губер, 1904 г.) | $u_{\text{ф}}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ | |
| Гипотеза О. Мора (Мор, 1882 г.) | $\tau_n = f(\sigma_n)$ | $\sigma_1 - m\sigma_3$ $m = \begin{cases} \sigma_{\text{тр}}/\sigma_{\text{тс}} - \text{пластичные материалы,} \\ \sigma_{\text{пчр}}/\sigma_{\text{пчс}} - \text{хрупкие материалы} \end{cases}$ | Для пластичных и хрупких материалов |

5. КРУЧЕНИЕ КРУГЛЫХ ВАЛОВ



Угол сдвига

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

Распределение касательных напряжений

$$\tau = \frac{M_{\text{к}}}{I_p} \rho$$

Максимальное касательное напряжение

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_{\text{к}}}{W_p}$$

Геометрические характеристики:

| | | |
|-------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Форма | | $\alpha = d_B / d_H$ |
| I_p | $\frac{\pi d^4}{32} \cong 0,1d^4$ | $\frac{\pi d_H^4}{32} (1 - \alpha^4)$ |
| W_p | $\frac{\pi d^3}{16} \cong 0,2d^3$ | $\frac{\pi d_H^3}{16} (1 - \alpha^4)$ |

- полярный момент инерции
- полярный момент сопротивления

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

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

Углы закручивания:

- относительный
- абсолютный (при $M_{\text{к}} = M = \text{const}$)

$$\theta = d\varphi/dz = M_{\text{к}} / (GI_p),$$

$$\varphi = M_{\text{к}} l / (GI_p).$$

Расчет валов сводится к одновременному удовлетворению двух условий:

- прочности $\tau_{\text{max}} = M_{\text{к max}} / W_p \leq [\tau]$, откуда $d_{\text{пч}} \geq \sqrt[3]{\frac{16M_{\text{к max}}}{\pi[\tau]}}$;
- жесткости $\theta_{\text{max}} = M_{\text{к max}} / (GI_p) \leq [\theta]$, откуда $d_{\text{ж}} \geq \sqrt[4]{\frac{32M_{\text{к max}}}{\pi G[\theta]}}$.

Допускаемые величины:

- касательное напряжение $[\tau] = \begin{cases} (0,55...0,60)[\sigma_p] & \text{- для стали;} \\ (1,0...1,2)[\sigma_p] & \text{- для чугуна;} \end{cases}$
- относительный угол закручивания $[\theta] = 3,5...17,5 \text{ мрад/м } (0,20...1,0 \text{ град/м}).$

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

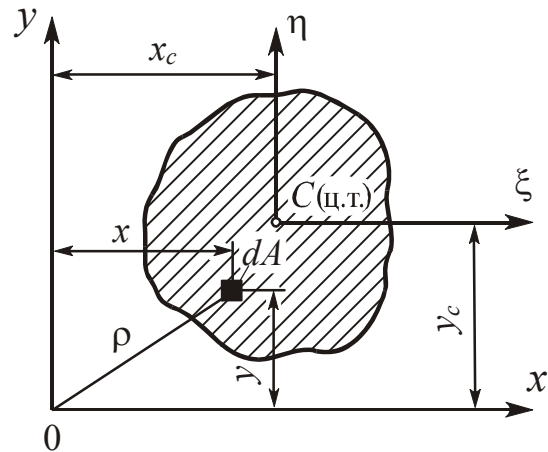
6. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

Статические моменты

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

Координаты центра тяжести

$$x_c = S_y / A, \quad y_c = S_x / A.$$



Моменты инерции:

- осевые $I_x = \int_A y^2 dA, \quad I_y = \int_A x^2 dA;$

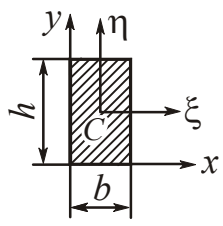
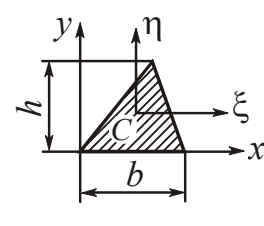
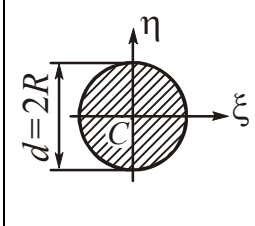
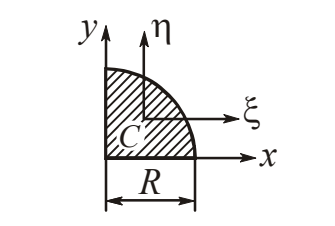
- центробежный $I_{xy} = \int_A xy dA;$

- полярный $I_p = \int_A \rho^2 dA = \int_A \rho^2 dA = \int_A (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y.$

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

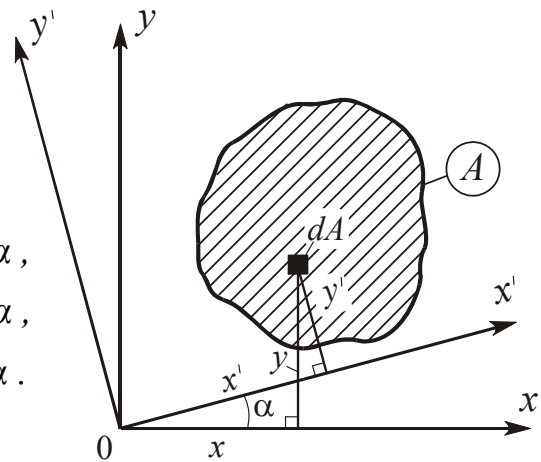
Преобразование моментов инерции при параллельном переносе осей (переход от центральных осей ξ, η к произвольным x, y):

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

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

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

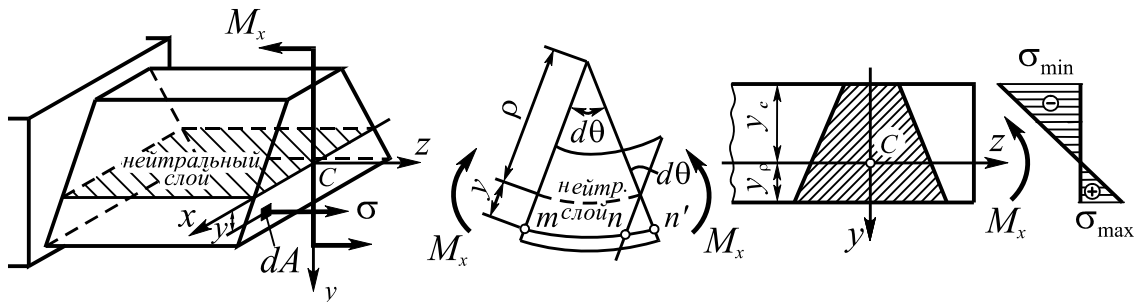
$$I_{\max}^{\min} = I_{1,2} = 0,5 \left[(I_x + I_y) \pm \sqrt{(I_x - I_y)^2 + 4I_{xy}^2} \right].$$

Положение главных осей

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max}^{\min} = (I_x - I_{\max}^{\min}) / I_{xy}.$$

7. ПЛОСКИЙ ПРЯМОЙ ИЗГИБ

7.1. Определение напряжений и расчет на прочность НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ



Кривизна оси балки

$$1/\rho = M_x / (EI_x)$$

Распределение нормальных напряжений

$$\sigma = \frac{E y}{\rho} = \frac{M_x}{I_x} y$$

Условия прочности :

- для хрупких материалов

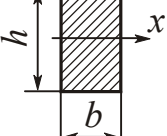
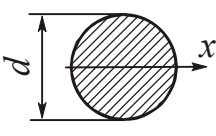
$$\begin{cases} \sigma_{\max} = (M_{\max} / I_x) y_p = M_{\max} / W_p \leq [\sigma_p], \\ \sigma_{\min} = (M_{\max} / I_x) y_c = M_{\max} / W_c \leq [\sigma_c], \end{cases}$$

где $W_p = I_x / y_p$ и $W_c = I_x / y_c$ – моменты сопротивления соответственно растянутых и сжатых волокон ;

- для пластичных материалов

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

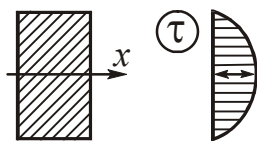
где $W_x = I_x / y_{\text{наиб}}$ – осевой момент сопротивления.

| | | | |
|---|------------------------------------|--|---|
|  | $I_x = bh^3 / 12$ $W_x = bh^2 / 6$ |  | $I_x = \pi d^4 / 64$ $W_x = \pi d^3 / 32$ |
|---|------------------------------------|--|---|

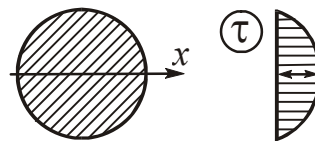
КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Формула Журавского

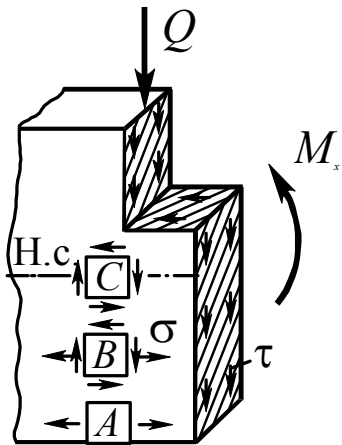
$$\tau = QS_x^{\text{отс}} / (bI_x)$$



$$\tau_{\max} = \frac{3 Q}{2 A}$$



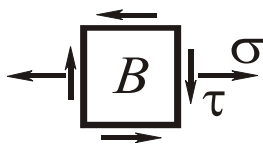
$$\tau_{\max} = \frac{4 Q}{3 A}$$



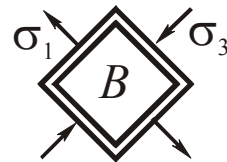
Условие прочности $\tau_{\max} = kQ / A \leq [\tau]$,

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

ГЛАВНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ



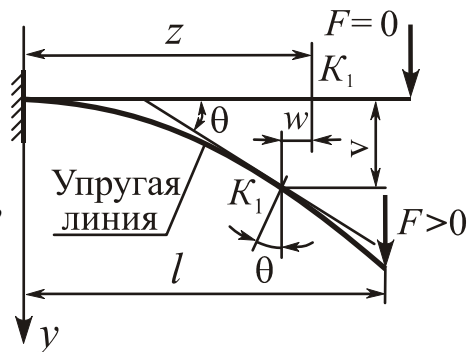
$$\sigma_{1,3} = 0,5[\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}]$$



7.2. Определение перемещений и расчет на жесткость

Перемещения :

- *линейные* — прогиб v ,
 смещение $w \ll v$,
- *угловое* (угол поворота) $\theta = dv / dz$.

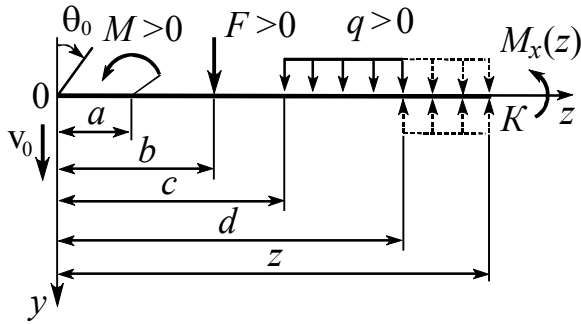


Основное дифференциальное уравнение упругой линии балки

$$v'' = \pm M_x / (EI_x)$$

| | | | |
|--|----------------------------|--|----------------------------|
| | $v'' = + \frac{M_x}{EI_x}$ | | $v'' = - \frac{M_x}{EI_x}$ |
|--|----------------------------|--|----------------------------|

МЕТОД НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ



$$\Theta(z) = \Theta_0 - \frac{1}{EI_x} \int_0^z M_x dz,$$

$$v(z) = v_0 + \Theta_0 z - \frac{1}{EI_x} \int_0^z \left(\int_0^z M_x dz \right) dz,$$

$$\Theta(z) = \Theta_0 + \frac{1}{EI_x} \sum^{«Л»} \left[\frac{M(z-a)}{1!} + \frac{F(z-b)^2}{2!} + q \frac{(z-c)^3}{3!} - q \frac{(z-d)^3}{3!} \right],$$

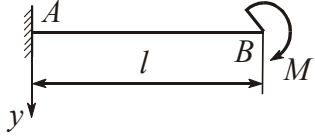
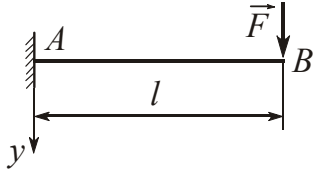
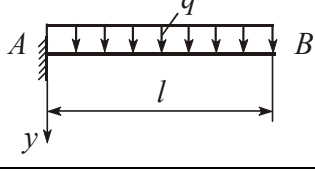
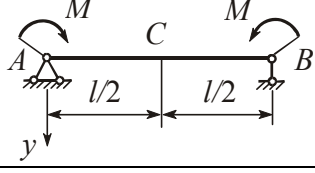
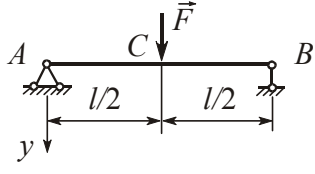
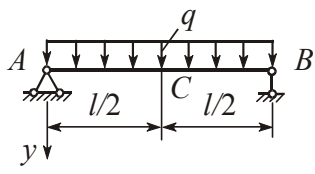
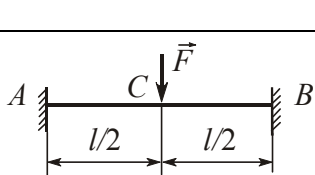
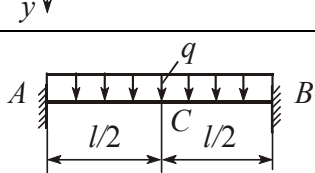
$$v(z) = v_0 + \Theta_0 z + \frac{1}{EI_x} \sum^{«Л»} \left[\frac{M(z-a)^2}{2!} + \frac{F(z-b)^3}{3!} + q \frac{(z-c)^4}{4!} - q \frac{(z-d)^4}{4!} \right].$$

Значок «Л» над символом суммы обозначает, что суммируются только те величины, которые относятся к части балки, расположенной *слева* от того сечения, где ищется перемещения.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД

| Интеграл Мора | | Правило Верещагина | Формула Симпсона | |
|------------------|-------------|--|--|---------|
| | | $I = \int_1 M_F \bar{M} dz = \omega_F c$ | $I = \frac{l}{6} (M_л \bar{M}_л + 4M_сп \bar{M}_сп + M_п \bar{M}_п)$ | |
| Фи- гу- ра | Треугольник | Квадратная парабола | | |
| | | | | |
| Ω | $hl/2$ | $hl/3$ | $2hl/3$ | $2hl/3$ |

8. СИЛОВЫЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ БАЛОК

| Схемы балок | Изгибающий момент | Прогиб | Угол поворота |
|---|---|---------------------------------------|---|
|  | $M_x = M = \text{const}$ | $V_B = \frac{Ml^2}{2EI}$ | $\Theta_B = \frac{Ml}{EI}$ |
|  | $M_A = -Fl$ | $V_B = \frac{Fl^3}{3EI}$ | $\Theta_B = \frac{Fl^2}{2EI}$ |
|  | $M_A = -ql^2 / 2$ | $V_B = \frac{ql^4}{8EI}$ | $\Theta_B = \frac{ql^3}{6EI}$ |
|  | $M_x = M = \text{const}$ | $V_C = \frac{Ml^2}{8EI}$ | $\Theta_A = \frac{Ml}{2EI}$ |
|  | $M_C = Fl / 4$ | $V_C = \frac{Fl^3}{48EI}$ | $\Theta_A = \frac{Fl^2}{16EI}$ |
|  | $M_C = ql^2 / 8$ | $V_C = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}$ | $\Theta_C = 0,$ $\Theta_A = \frac{ql^3}{24EI}$ |
|  | $M_A = -Fl / 8$ $M_C = Fl / 8$ | $V_C = \frac{Fl^3}{192EI}$ | $\Theta_A = \Theta_C = 0$ |
|  | $M_A = -ql^2 / 12$ $M_C = ql^2 / 24$ | $V_C = \frac{ql^4}{384EI}$ | $\Theta_A = \Theta_C = 0$ |

9. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ СИСТЕМЫ

Конструкцию, усилия в которой не могут быть определены только при помощи уравнений статики, 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

$$EI \delta_{ij} = \int_0^l \overline{M}_i \overline{M}_j dz, \quad EI \Delta_{iF} = \int_0^l \overline{M}_i M_F dz.$$

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

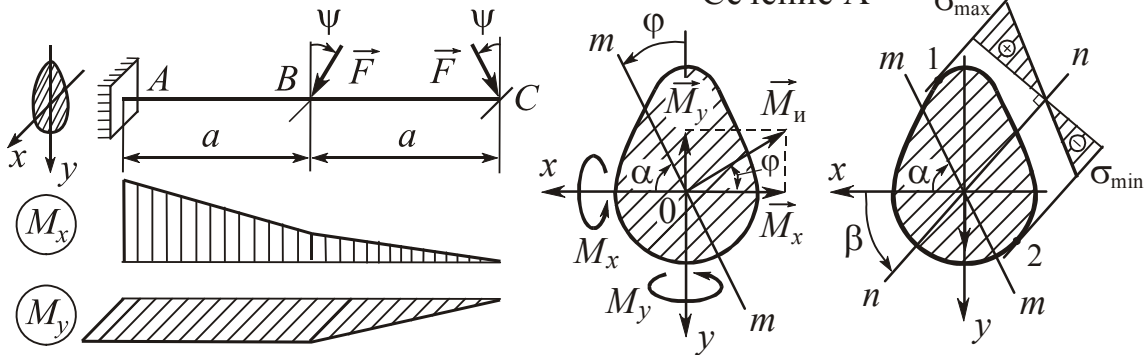
4. Строятся эпюры внутренних силовых факторов.

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

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

Связь между угловыми коэффициентами

$$k_1 k_2 = -I_x / I_y$$

Распределение нормальных напряжений

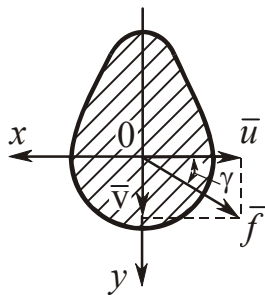
$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x \quad \text{или} \quad \sigma = M_n \left(\frac{\cos \varphi}{I_x} y + \frac{\sin \varphi}{I_y} x \right)$$

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



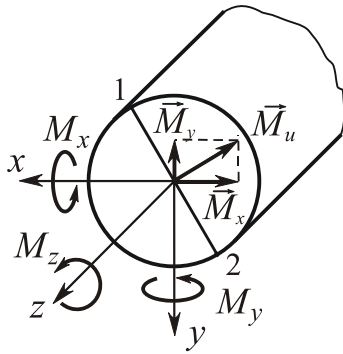
$$\sigma_{\max} = M_x / W_x + M_y / W_y \leq [\sigma].$$

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

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

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

Примечание. При плоском косом изгибе $\vec{f} \perp nn$.



10.2. Изгиб с кручением

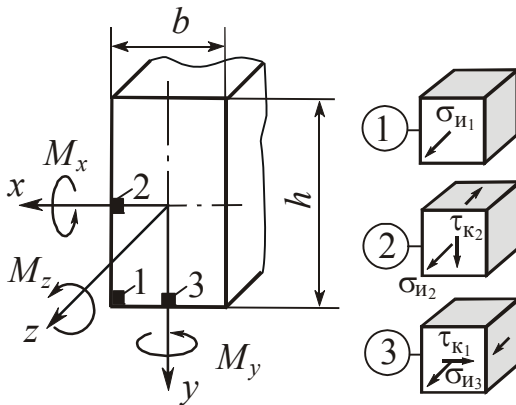
10.2.1. Стержень круглого сечения

Условие прочности

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

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

10.2.2. Стержень прямоугольного сечения



$$\sigma_{\text{ЭКВ}_1} = \sigma_{n1} = M_x / W_x + M_y / W_y,$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}_2} = \sqrt{\sigma_{n2}^2 + 4\tau_{k2}^2},$$

$$\sigma_{u_2} = M_y / W_y, \quad \tau_{k_2} = M_z / (\beta b^3),$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}_3} = \sqrt{\sigma_{n3}^2 + 4\tau_{k3}^2},$$

$$\sigma_{u_3} = M_x / W_x, \quad \tau_{k_3} = \gamma \tau_{k_2}.$$

Условие прочности

$$\max = \{\sigma_{\text{ЭКВ}_1}, \sigma_{\text{ЭКВ}_2}, \sigma_{\text{ЭКВ}_3}\} \leq [\sigma]$$

10.3. Внецентренное продольное нагружение

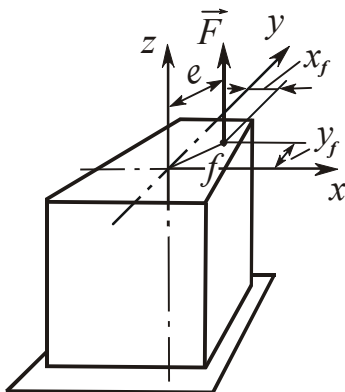
Распределение нормальных напряжений

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

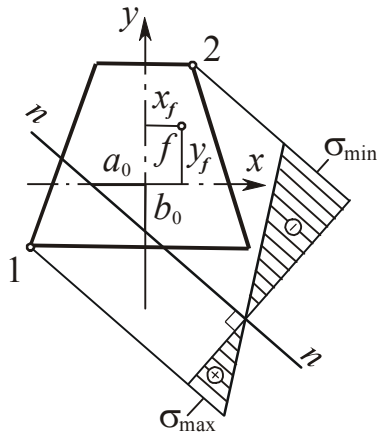
Знак «плюс» соответствует растяжению,
«минус» – сжатию.

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



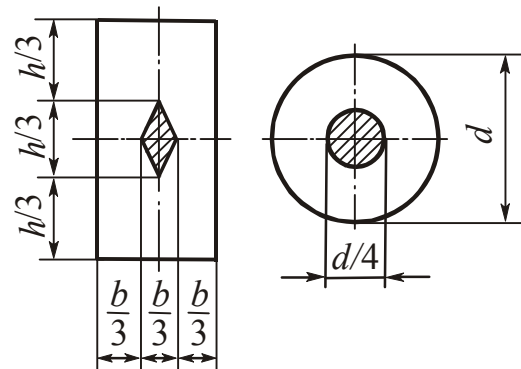
Условия прочности

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

Ядро сечения

Координаты
вершин

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



11. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СИСТЕМ

11.1. Продольный изгиб

Формула Эйлера

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

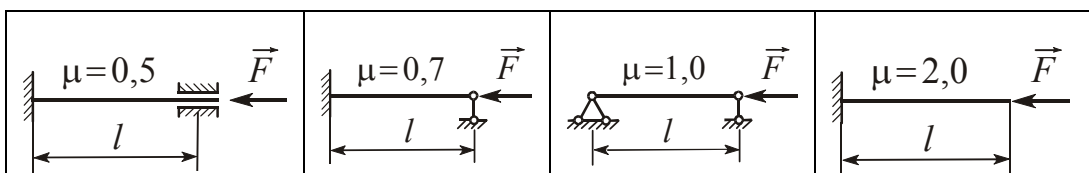
$$F_{\text{кр}} = \pi^2 EI_{\min} / (\mu l)^2 \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{кр}} = \pi^2 E / \lambda^2.$$

Формула Тетмайера - Ясинского

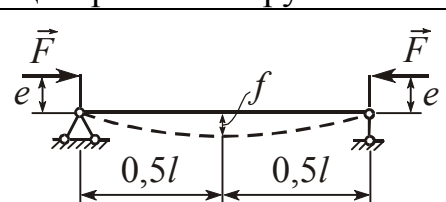
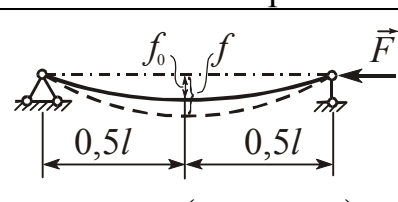
(стержни средней гибкости, для которых $\sigma_{\text{кр}} \geq \sigma_{\text{пц}}$)

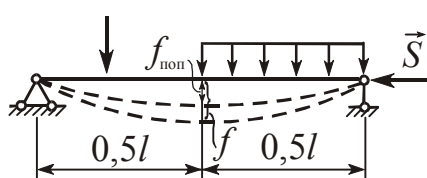
$$F_{\text{кр}} = A (a - b\lambda + c\lambda^2) \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{кр}} = a - b\lambda + c\lambda^2.$$

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



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

| Внецентренное нагружение | Учет начального искривления |
|---|---|
|  $f = (4e / \pi) / (F_{\text{Э}} / F - 1)$ |  $f = f_0 / (1 - F / F_{\text{Э}})$ |
| $F_{\text{Э}} = \pi^2 EI / l^2$ – эйлера критическая сила | |



11.2. Продольно-поперечный изгиб

Максимальный прогиб

$$f = f_{\text{поп}} / (1 - S / S_{\text{Э}}).$$

Максимальное напряжение

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

Условие прочности $\sigma_{\text{рас}} = \frac{S}{A} + \frac{1}{W_x} \left(M_{\text{поп}} + \frac{Sf_{\text{поп}}[n]}{1 - [n]S / S_{\text{Э}}} \right) \leq [\sigma].$

Условие жесткости $f \leq [f].$

11.3. Устойчивость труб

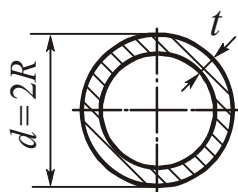
Критическая нагрузка

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

Для стальных труб ($E = 200 \text{ ГПа}, \nu = 0,3$)

$$p_{кр} = 55(20t / d)^3 \text{ МПа.}$$

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

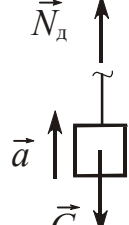
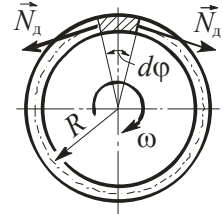


12. ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ

Общие зависимости

$$\sigma_d = k_d \sigma_{ст}, \quad \delta_d = k_d \delta_{ст}$$

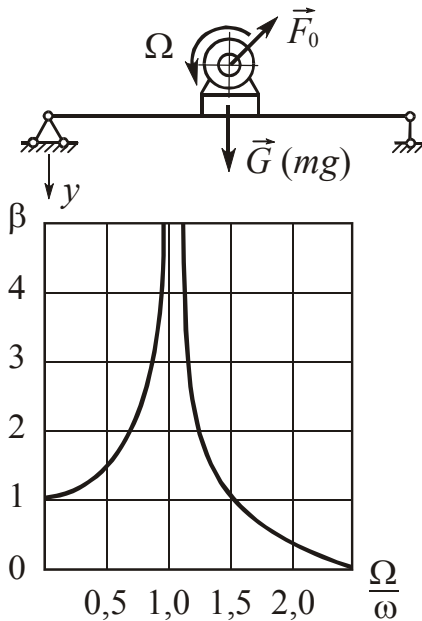
12.1. Учет сил инерции

| | | | |
|---|--|---|---|
|  | <p>Поступательное движение</p> $\sigma_d = k_d \sigma_{ст}$ $k_d = 1 + a/g,$ $\sigma_{ст} = G/A$ | <p>Равномерно вращающееся тонкое кольцо</p> $\sigma_d = \rho \omega^2 R^2 = \rho v^2$ |  |
|---|--|---|---|

12.2. Действие удара на конструкцию

| | | |
|---|---|--|
| <p>Продольный удар</p>  $\Delta l_{ст} = Gl/(EA)$ $k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta l_{ст}}}$ | <p>Удар в канатах при заедании троса</p>  $k_d = 1 + \frac{v_0}{g \Delta l_{ст}}$ | <p>Поперечный удар</p>  $k_d = 1 + \sqrt{1 + 2H/f_{ст}}$ |
|---|---|--|

12.3. Колебания упругих систем с одной степенью свободы



Уравнение колебаний упругой системы (неустановившееся движение)

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

происходящих под действием возмущающей силы $F_{воз} = F_0 \sin \Omega t$, где F_0 - центробежная сила инерции неуравновешенных масс ротора.

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

Амплитуда вынужденных колебаний

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

$\beta = \left| \frac{1}{1 - (\Omega/\omega)^2} \right|$ - коэффициент нарастания колебаний.

Динамический коэффициент $k_d = 1 + (F_0/G)\beta$.

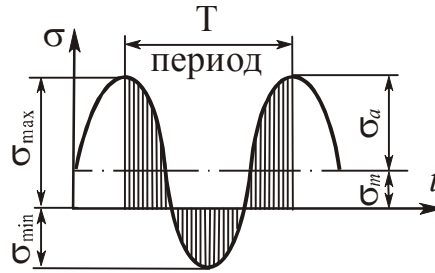
13. ПЕРЕМЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Параметры цикла:

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

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

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



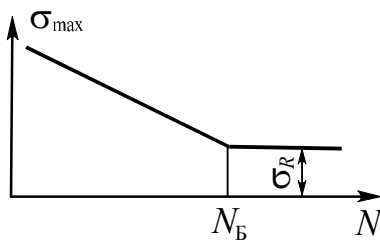
Характерные

циклы:

- симметричный



- пульсационный



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 $(5...10)10^7$ для цветных металлов.

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

$$\sigma_{-1} \approx (0,25...0,5)\sigma_{\text{пч}}; \quad \sigma_{-1p} \approx 0,75\sigma_{-1}; \quad \tau_{-1} \approx (0,6...0,8)\sigma_{-1}.$$

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 $K_F = \sigma_{-1F} / \sigma_{-1};$

4) поверхностное упрочнение $K_v = \sigma_{-1y} / \sigma_{-1};$

5) асимметрия цикла (коэффициенты чувствительности ψ_{σ} и ψ_{τ});

6) эксплуатационные факторы (коррозия, температура и др.).

Коэффициент снижения предела выносливости

$$K = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) / K_v.$$

$$\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_{\sigma}}{1 + (88,3\bar{G}/L)^{\psi_{\sigma}}}.$$

Запас прочности определяется:

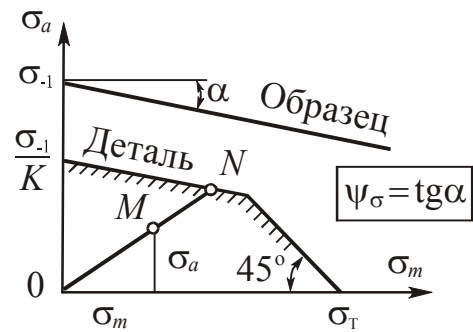
- по формуле Серенсена - Кинасошвили (при простых видах деформации)

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

$$n_{\tau} = \tau_{-1} / (K\tau_a + \psi_{\tau}\tau_m);$$

- по формуле Гафа и Полларда (при плоском напряженном состоянии)

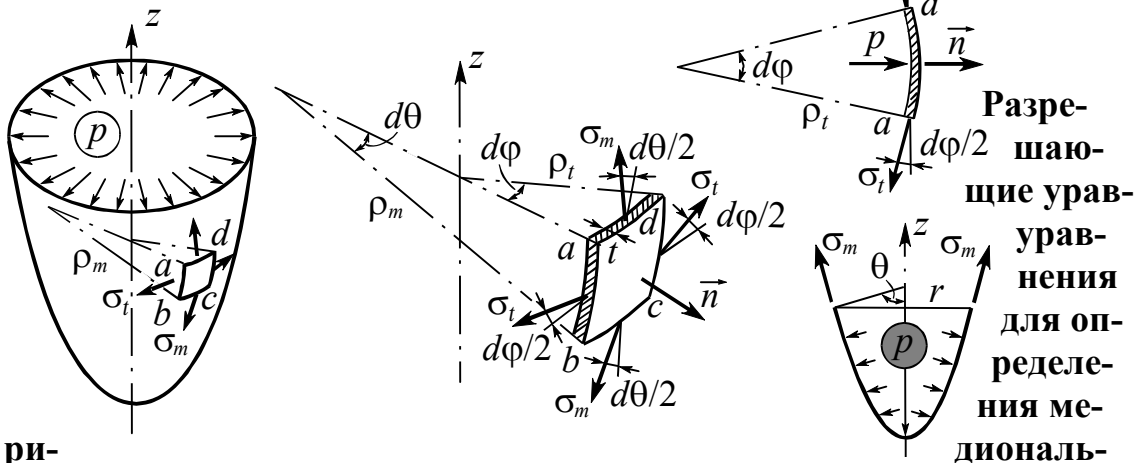
$$n_R = n_{\sigma}n_{\tau} / \sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}.$$



14. 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.



ри-ного σ_m и окружного σ_t напряжений:

- уравнение Лапласа (получается из уравнения равновесия элемента $abcd$ в проекции на нормаль \vec{n})

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

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

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

| | |
|-------------------|----------------------|
| Сферический сосуд | Цилиндрический сосуд |
|-------------------|----------------------|

| | |
|--|--|
| $\sigma_m = \sigma_t = pd / 4t$ $\sigma_r = 0$ $\sigma_{\text{ЭКВ III}} = pd / 4t$ | $\sigma_m = pd / 4t$ $\sigma_r = 0$ $\sigma_t = pd / 2t$ $\sigma_{\text{ЭКВ III}} = pd / 2t$ |
|--|--|

Условие прочности

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma].$$

15. ТОЛСТОСТЕННЫЕ ТРУБЫ

Допущение: нагрузка осесимметрична и постоянна вдоль оси.

Основные уравнения:

- уравнение равновесия

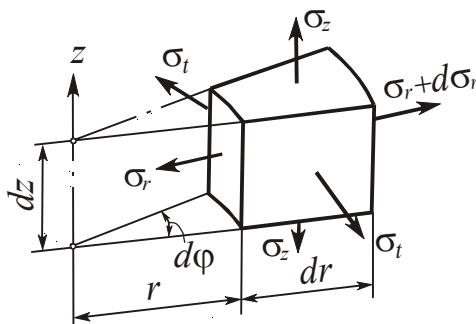
$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r) - \sigma_t = 0,$$

- геометрические

$$\varepsilon_r = du / dr, \quad \varepsilon_t = u / r,$$

- физические (закон Гука)

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

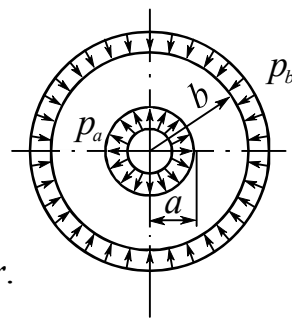


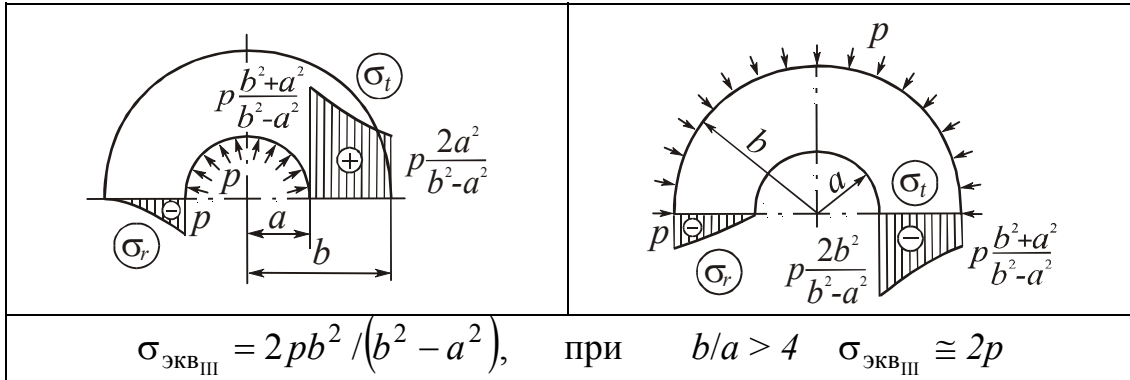
Разрешающие уравнения $\sigma_{r,t} = A \mp B / r^2$, где A и B – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий задачи.

15.1. Труба, нагруженная внутренним и внешним давлением (задача Ламе)

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

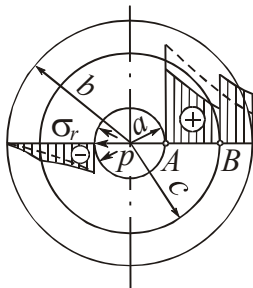
$$u = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{a^2 b^2}{r} \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2} - \frac{\nu}{E} \sigma_z r.$$





15.2. 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 ($\sigma_{\text{экв}_A} = \sigma_{\text{экв}_B}$)

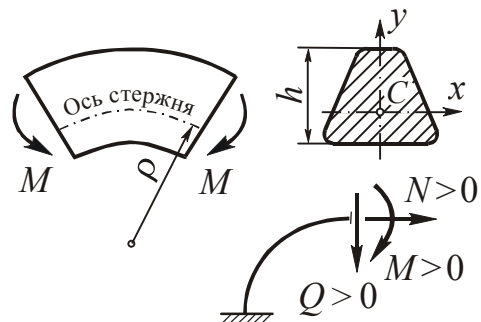
$$\Delta = \frac{2p}{E} \frac{cb^2(c^2 - a^2)}{b^2(c^2 - a^2) + c^2(b^2 - c^2)}$$

Условия Гадолина: $c = \sqrt{ab}$, $\sigma_{\text{экв}}^{\min} = pb / (b - a)$.

16. ПЛОСКИЕ КРИВЫЕ СТЕРЖНИ

Классификация стержней:

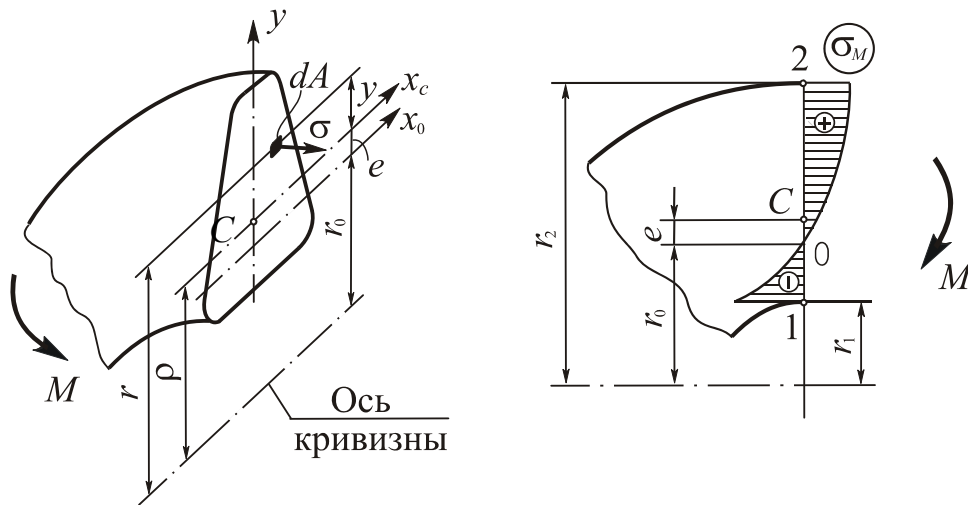
- малой кривизны $h/\rho < 1/5$;
- средней кривизны $1/5 \leq h/\rho \leq 1/2$;
- большой кривизны $h/\rho > 1/2$.



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

$$r_0 = A / \left(\int_A dA / r \right)$$

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

$$e \cong I_{xc} / (\rho A).$$

Закон распределения нормальных напряжений

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

Условие прочности

$$\sigma_{\text{рас}} \leq [\sigma],$$

$$\sigma_{\text{рас}} = \max \left\{ \sigma_{\text{рас}1}, \sigma_{\text{рас}2} \right\} \quad \begin{cases} \sigma_{\text{рас}1} = \left| \sigma_N + \sigma_{M1} \right|, \\ \sigma_{\text{рас}2} = \left| \sigma_N + \sigma_{M2} \right|, \end{cases}$$

$$\sigma_{M1} = (M / Ae) (1 - r_0 / r_1), \quad \sigma_{M2} = (M / Ae) (1 - r_0 / r_2).$$

Примечание. Для сечений, симметричных относительно центральной оси x_C (прямоугольник, круг и т. п.), $\sigma_{\text{рас}1} > \sigma_{\text{рас}2}$, т. е. опасной является внутренняя точка (**т. 1**).

Приложение 3

СПРАВОЧНЫЕ ДАнные

1. НОРМАЛЬНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ

в диапазоне от 1 до 250 мм
(по ГОСТ 6636-86)

Ra5: 1; 1,16; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250.

Ra10: 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250.

Ra20: 1; 1,1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,5; 2,8; 3; 3,6; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 32; 36; 40; 45; 50; 55; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 250.

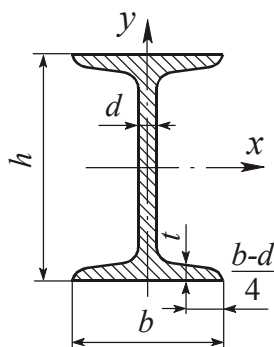
Ra40: 1; 1,05; 1,1; 1,15; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5; 2,6; 2,8; 3; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4; 4,2; 4,5; 4,8; 5; 5,2; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 21; 22; 24; 25; 26; 28; 30; 32; 34; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50; 52; 55; 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; 230; 240; 250.

2. КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СИ

| 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} |

3. СОРТАМЕНТ ПРОКАТНОЙ СТАЛИ

Таблица 3.1



Двутавры стальные горячекатаные (по ГОСТ 8239-89)

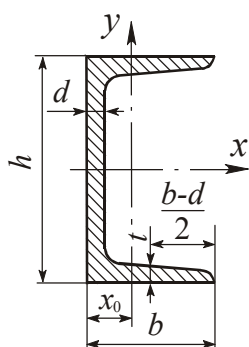
A – площадь поперечного сечения;
 I – момент инерции;
 i – радиус инерции;
 m – масса одного погонного метра.

W – момент сопротивления;
 S – статический момент полусечения;

| № | h , мм | b , мм | d , мм | t , мм | A , см ² | m , кг | 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 |
|-----|----------|----------|----------|----------|-----------------------|----------|-------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 10 | 100 | 55 | 4,5 | 7,2 | 12,0 | 9,46 | 198 | 39,7 | 4,06 | 23,0 | 17,9 | 6,49 | 1,22 |
| 12 | 120 | 64 | 4,8 | 7,3 | 14,7 | 11,50 | 350 | 58,4 | 4,88 | 33,7 | 27,9 | 8,72 | 1,38 |
| 14 | 140 | 73 | 4,9 | 7,5 | 17,4 | 13,70 | 572 | 81,7 | 5,73 | 46,8 | 41,9 | 11,50 | 1,55 |
| 16 | 160 | 81 | 5,0 | 7,8 | 20,2 | 15,90 | 873 | 109,0 | 6,57 | 62,3 | 58,6 | 14,50 | 1,70 |
| 18 | 180 | 90 | 5,1 | 8,1 | 23,4 | 18,40 | 1290 | 143,0 | 7,42 | 81,4 | 82,6 | 18,40 | 1,88 |
| 18a | 180 | 100 | 5,1 | 8,3 | 25,4 | 19,90 | 1430 | 159,0 | 7,51 | 89,8 | 114,0 | 22,80 | 2,12 |
| 20 | 200 | 100 | 5,2 | 8,4 | 26,8 | 21,00 | 1840 | 184,0 | 8,28 | 104,0 | 115,0 | 23,10 | 2,07 |
| 20a | 200 | 110 | 5,2 | 8,6 | 28,9 | 22,70 | 2030 | 203,0 | 8,37 | 114,0 | 155,0 | 28,20 | 2,32 |
| 22 | 220 | 110 | 5,4 | 8,7 | 30,6 | 24,00 | 2550 | 232,0 | 9,13 | 131,0 | 157,0 | 28,60 | 2,27 |
| 22a | 220 | 120 | 5,4 | 8,9 | 32,8 | 25,80 | 2790 | 254,0 | 9,22 | 143,0 | 206,0 | 34,30 | 2,50 |
| 24 | 240 | 115 | 5,6 | 9,5 | 34,8 | 27,30 | 3460 | 289,0 | 9,97 | 163,0 | 198,0 | 34,50 | 2,37 |
| 24a | 240 | 125 | 5,6 | 9,8 | 37,5 | 29,40 | 3800 | 317,0 | 10,10 | 178,0 | 260,0 | 41,60 | 2,63 |
| 27 | 270 | 125 | 6,0 | 9,8 | 40,2 | 31,50 | 5010 | 371,0 | 11,20 | 210,0 | 260,0 | 41,50 | 2,54 |
| 27a | 270 | 135 | 6,0 | 10,2 | 43,2 | 33,90 | 5500 | 407,0 | 11,30 | 229,0 | 337,0 | 50,00 | 2,80 |
| 30 | 300 | 135 | 6,5 | 10,2 | 46,5 | 36,50 | 7080 | 472,0 | 12,30 | 268,0 | 337,0 | 49,90 | 2,69 |
| 30a | 300 | 145 | 6,5 | 10,7 | 49,5 | 39,20 | 7780 | 518,0 | 12,50 | 292,0 | 436,0 | 60,10 | 2,95 |
| 33 | 330 | 140 | 7,0 | 11,2 | 53,8 | 42,20 | 9840 | 597,0 | 13,50 | 339,0 | 419,0 | 59,90 | 2,79 |
| 36 | 360 | 145 | 7,5 | 12,3 | 61,9 | 48,60 | 13380 | 743,0 | 14,70 | 423,0 | 516,0 | 71,10 | 2,89 |
| 40 | 400 | 155 | 8,3 | 13,0 | 72,6 | 57,00 | 19062 | 953,0 | 16,20 | 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 | 108,0 | 76806 | 2560,0 | 23,60 | 1491,0 | 1725,0 | 182,00 | 3,54 |

Таблица 3.2

Швеллеры стальные горячекатаные (по ГОСТ 8240-89)

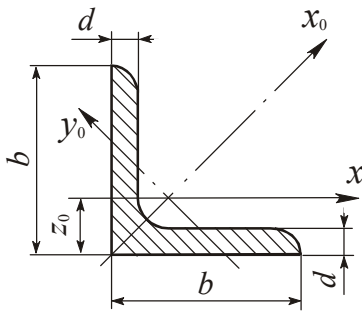


A – площадь поперечного сечения;
 I – момент инерции;
 i – радиус инерции;
 W – момент сопротивления;
 S – статический момент полусечения;
 t – масса одного погонного метра.

| № | h , мм | b , мм | d , мм | t , мм | A , см ² | m , кг | 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 | z_0 , 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 |
| 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 3.3

Уголки стальные горячекатаные равнополочные (по ГОСТ 8509-86)



A – площадь поперечного сечения;

I – момент инерции; i – радиус инерции;

m – масса одного погонного метра.

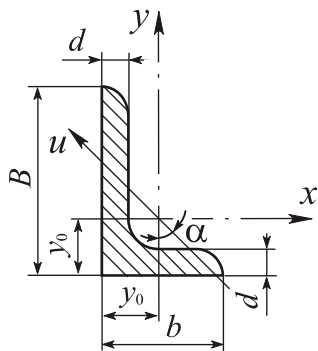
| № | b , мм | d , мм | A , см ² | m , кг | I_x , см ⁴ | i_x , см | $I_{x_0 \max}$, см ⁴ | $i_{x_0 \min}$, см ⁴ | $I_{y_0 \min}$, см ⁴ | $i_{y_0 \min}$, см ⁴ | z_0 , см |
|-----|-------------|-------------|--------------------------|-------------|----------------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| 4 | 40 | 3 | 2,35 | 1,85 | 3,55 | 1,23 | 5,63 | 1,55 | 1,47 | 0,79 | 1,09 |
| | | 4 | 3,08 | 2,42 | 4,58 | 1,22 | 7,26 | 1,53 | 1,90 | 0,78 | 1,13 |
| | | 5 | 3,79 | 2,97 | 5,53 | 1,20 | 8,75 | 1,54 | 2,30 | 0,79 | 1,17 |
| 4,5 | 45 | 3 | 2,65 | 2,08 | 5,13 | 1,39 | 8,13 | 1,75 | 2,12 | 0,89 | 1,21 |
| | | 4 | 3,48 | 2,73 | 6,63 | 1,38 | 10,5 | 1,74 | 2,74 | 0,89 | 1,26 |
| | | 5 | 4,29 | 3,37 | 8,03 | 1,37 | 12,7 | 1,72 | 3,33 | 0,88 | 1,30 |
| 5 | 50 | 3 | 2,96 | 2,32 | 7,11 | 1,55 | 11,3 | 1,95 | 2,95 | 1,00 | 1,33 |
| | | 4 | 3,89 | 3,05 | 9,21 | 1,54 | 14,6 | 1,94 | 3,80 | 0,99 | 1,38 |
| | | 5 | 4,80 | 3,77 | 11,2 | 1,53 | 17,8 | 1,92 | 4,63 | 0,98 | 1,42 |
| 5,6 | 56 | 4 | 4,38 | 3,44 | 13,1 | 1,73 | 20,8 | 2,18 | 5,41 | 1,11 | 1,52 |
| | | 5 | 5,41 | 4,25 | 16,0 | 1,72 | 25,4 | 2,16 | 6,59 | 1,10 | 1,57 |
| 6,3 | 63 | 4 | 4,96 | 3,90 | 18,9 | 1,95 | 29,9 | 2,45 | 7,81 | 1,25 | 1,69 |
| | | 5 | 6,13 | 4,81 | 23,1 | 1,94 | 36,6 | 2,44 | 9,52 | 1,25 | 1,74 |
| | | 6 | 7,28 | 5,72 | 27,1 | 1,93 | 42,9 | 2,43 | 11,2 | 1,24 | 1,78 |
| 7 | 70 | 4,5 | 6,20 | 4,87 | 29,0 | 2,16 | 46,0 | 2,72 | 12,0 | 1,39 | 1,88 |
| | | 5 | 6,86 | 5,38 | 31,9 | 2,16 | 50,7 | 2,72 | 13,2 | 1,39 | 1,90 |
| | | 6 | 8,15 | 6,39 | 37,6 | 2,15 | 59,6 | 2,71 | 15,5 | 1,38 | 1,94 |
| | | 7 | 9,42 | 7,93 | 43,0 | 2,14 | 68,2 | 2,69 | 17,8 | 1,37 | 1,99 |
| | | 8 | 10,7 | 8,37 | 48,2 | 2,13 | 76,4 | 2,68 | 20,0 | 1,49 | 2,02 |
| 7,5 | 75 | 5 | 7,39 | 5,80 | 39,5 | 2,31 | 62,6 | 2,91 | 16,4 | 1,49 | 2,02 |
| | | 6 | 8,78 | 6,89 | 46,6 | 2,30 | 73,9 | 2,90 | 19,3 | 1,48 | 2,06 |
| | | 7 | 10,1 | 7,96 | 53,3 | 2,29 | 84,6 | 2,89 | 22,1 | 1,48 | 2,10 |
| | | 8 | 11,5 | 9,02 | 59,8 | 2,28 | 94,9 | 2,87 | 24,8 | 1,47 | 2,15 |
| | | 9 | 12,8 | 10,1 | 66,1 | 2,27 | 105 | 2,86 | 27,5 | 1,46 | 2,18 |
| 8 | 80 | 5,5 | 8,63 | 6,78 | 52,7 | 2,47 | 83,6 | 3,11 | 21,8 | 1,59 | 2,17 |
| | | 6 | 9,38 | 7,36 | 57,0 | 2,47 | 90,4 | 3,11 | 23,5 | 1,58 | 2,19 |
| | | 7 | 10,8 | 8,51 | 65,3 | 2,45 | 104 | 3,09 | 27,0 | 1,58 | 2,23 |
| | | 8 | 12,3 | 9,65 | 73,4 | 2,44 | 116 | 3,08 | 30,3 | 1,57 | 2,27 |
| 9 | 90 | 6 | 10,6 | 8,33 | 82,1 | 2,78 | 130 | 3,50 | 34,0 | 1,79 | 2,43 |
| | | 7 | 12,3 | 9,64 | 94,3 | 2,77 | 150 | 3,49 | 38,9 | 1,78 | 2,47 |
| | | 8 | 13,9 | 10,9 | 106 | 2,76 | 168 | 3,48 | 43,8 | 1,77 | 2,51 |
| | | 9 | 15,6 | 12,2 | 118 | 2,75 | 186 | 3,46 | 48,6 | 1,77 | 2,55 |

Окончание табл. 3.3

| № | <i>b</i> , мм | <i>d</i> , мм | <i>A</i> , см ² | <i>m</i> , кг | <i>I_x</i> , см ⁴ | <i>i_x</i> , см | <i>I_{x0 max}</i> , см ⁴ | <i>i_{x0 min}</i> , см ⁴ | <i>I_{y0 min}</i> , см ⁴ | <i>i_{y0 min}</i> , см ⁴ | <i>z₀</i> , см |
|------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|---|------------------------------|--|--|--|--|------------------------------|
| 10 | 100 | 6,5 | 12,8 | 10,1 | 122 | 3,09 | 193 | 3,88 | 50,7 | 1,99 | 2,68 |
| | | 7 | 13,8 | 10,8 | 131 | 3,08 | 207 | 3,88 | 54,3 | 1,98 | 2,71 |
| | | 8 | 15,6 | 12,2 | 147 | 3,07 | 233 | 3,87 | 60,9 | 1,98 | 2,75 |
| | | 10 | 19,2 | 15,1 | 179 | 3,05 | 284 | 3,84 | 74,1 | 1,96 | 2,83 |
| | | 12 | 22,8 | 17,9 | 209 | 3,03 | 331 | 3,81 | 86,9 | 1,95 | 2,91 |
| | | 14 | 26,3 | 20,6 | 237 | 3,00 | 375 | 3,78 | 99,3 | 1,94 | 2,99 |
| | | 16 | 29,7 | 23,3 | 264 | 2,98 | 416 | 3,74 | 112 | 1,94 | 3,06 |
| 11 | 110 | 7 | 15,2 | 11,9 | 176 | 3,40 | 279 | 4,29 | 72,7 | 2,19 | 2,96 |
| | | 8 | 17,2 | 13,5 | 198 | 3,39 | 315 | 4,28 | 81,8 | 2,18 | 3,00 |
| 12,5 | 125 | 8 | 19,7 | 15,5 | 294 | 3,87 | 486 | 4,87 | 122 | 2,49 | 3,36 |
| | | 9 | 22,0 | 17,3 | 327 | 3,86 | 520 | 4,86 | 135 | 2,48 | 3,40 |
| | | 10 | 24,3 | 19,1 | 360 | 3,85 | 571 | 4,84 | 149 | 2,47 | 3,45 |
| | | 12 | 28,9 | 22,7 | 422 | 3,82 | 670 | 4,82 | 174 | 2,46 | 3,53 |
| | | 14 | 33,4 | 26,2 | 482 | 3,80 | 764 | 4,78 | 200 | 2,45 | 3,61 |
| | | 16 | 37,8 | 29,6 | 539 | 3,78 | 853 | 4,75 | 224 | 2,44 | 3,68 |
| 14 | 140 | 9 | 24,7 | 19,4 | 466 | 4,34 | 739 | 5,47 | 192 | 2,79 | 3,78 |
| | | 10 | 27,3 | 21,5 | 512 | 4,33 | 814 | 5,46 | 211 | 2,78 | 3,82 |
| | | 12 | 32,5 | 25,5 | 602 | 4,31 | 957 | 5,43 | 248 | 2,76 | 3,90 |
| 16 | 160 | 10 | 31,4 | 24,7 | 774 | 4,96 | 1229 | 6,25 | 319 | 3,19 | 4,30 |
| | | 11 | 34,4 | 27,0 | 844 | 4,95 | 1341 | 6,24 | 348 | 3,18 | 4,35 |
| | | 12 | 37,4 | 29,4 | 913 | 4,94 | 1450 | 6,23 | 376 | 3,17 | 4,39 |
| | | 14 | 43,3 | 34,0 | 1046 | 4,92 | 1662 | 6,20 | 431 | 3,16 | 4,47 |
| | | 16 | 49,1 | 38,5 | 1175 | 4,89 | 1866 | 6,17 | 485 | 3,14 | 4,55 |
| | | 18 | 54,8 | 43,0 | 1299 | 4,87 | 2061 | 6,13 | 537 | 3,13 | 4,63 |
| | | 24 | 60,4 | 47,4 | 1419 | 4,85 | 2248 | 6,10 | 589 | 3,12 | 4,70 |
| 18 | 180 | 11 | 38,8 | 30,5 | 1216 | 5,60 | 1933 | 7,06 | 500 | 3,59 | 4,85 |
| | | 12 | 42,2 | 33,1 | 1317 | 5,59 | 2093 | 7,04 | 540 | 3,58 | 4,89 |
| 20 | 200 | 12 | 47,1 | 37,0 | 1823 | 6,22 | 2896 | 7,84 | 749 | 3,99 | 5,73 |
| | | 13 | 50,9 | 39,9 | 1961 | 6,21 | 3116 | 7,83 | 805 | 3,98 | 5,42 |
| | | 14 | 54,6 | 42,8 | 2097 | 6,20 | 3333 | 7,81 | 761 | 3,97 | 5,46 |
| | | 16 | 62,0 | 48,7 | 2363 | 6,17 | 3755 | 7,78 | 970 | 3,96 | 5,54 |
| | | 20 | 76,5 | 60,1 | 2871 | 6,12 | 4560 | 7,72 | 1182 | 3,93 | 5,70 |
| | | 25 | 94,3 | 74,0 | 3466 | 6,06 | 5494 | 7,63 | 1438 | 3,91 | 5,89 |
| | | 30 | 111,5 | 87,6 | 4020 | 6,00 | 6351 | 7,55 | 1688 | 3,89 | 6,07 |
| 22 | 220 | 14 | 60,4 | 47,4 | 2814 | 6,83 | 4470 | 8,60 | 1159 | 4,38 | 5,93 |
| | | 16 | 68,6 | 53,8 | 3175 | 6,81 | 5045 | 8,58 | 1306 | 4,36 | 6,02 |
| 24 | 240 | 16 | 78,4 | 61,5 | 4717 | 7,76 | 7492 | 9,78 | 1942 | 4,98 | 6,75 |
| | | 18 | 87,7 | 68,9 | 5247 | 7,73 | 8337 | 9,75 | 2158 | 4,96 | 6,83 |
| | | 20 | 97,0 | 76,1 | 5765 | 7,71 | 9160 | 9,72 | 2370 | 4,94 | 6,91 |
| 25 | 250 | 22 | 106,1 | 83,3 | 6270 | 7,69 | 9961 | 9,69 | 2579 | 4,93 | 7,00 |
| | | 25 | 119,7 | 94,0 | 7006 | 7,65 | 1112 | 9,54 | 2887 | 4,91 | 7,11 |
| | | 28 | 133,1 | 104,5 | 7717 | 7,61 | 1224 | 9,59 | 3190 | 4,89 | 7,23 |
| | | 30 | 142,0 | 11,4 | 8177 | 7,59 | 1296 | 9,56 | 3389 | 4,89 | 7,31 |

Таблица 3.4

Уголки стальные горячекатаные неравнополочные (по ГОСТ 8510-86)



A – площадь поперечного сечения;

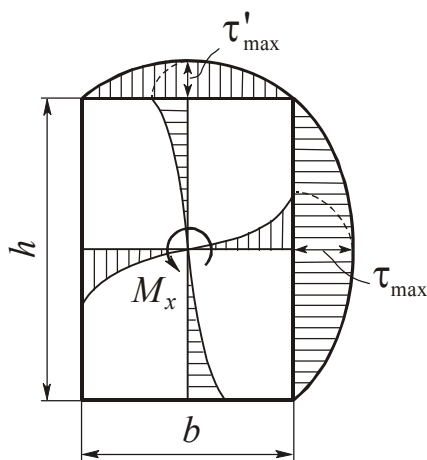
I – момент инерции;

i – радиус инерции; α – угол наклона главной оси

| № | B, мм | b, мм | d, мм | A, см ² | m, кг | I _x , см ⁴ | i _x , см | I _y , см ⁴ | i _y , см | y ₀ , см | x ₀ , см | I _u min, см ⁴ | i _u min, см | tgα |
|-----------|----------|----------|----------|-----------------------|----------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---|------------------------------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 7,5 / 5 | 75 | 50 | 5 | 6,11 | 7,79 | 34,8 | 2,30 | 12,5 | 1,43 | 2,39 | 1,17 | 7,24 | 1,09 | 0,436 |
| | | | 6 | 7,25 | 5,69 | 40,9 | 2,38 | 14,6 | 1,42 | 2,44 | 1,21 | 8,48 | 1,08 | 0,435 |
| | | | 8 | 9,47 | 7,43 | 52,4 | 2,35 | 18,3 | 1,40 | 2,52 | 1,29 | 10,9 | 1,07 | 0,430 |
| 9 / 5,6 | 90 | 56 | 5 | 7,86 | 6,17 | 65,3 | 2,88 | 19,7 | 1,58 | 2,92 | 1,26 | 11,8 | 1,22 | 0,384 |
| | | | 6 | 8,54 | 6,70 | 70,6 | 2,88 | 21,2 | 1,58 | 2,95 | 1,28 | 12,7 | 1,22 | 0,384 |
| | | | 8 | 11,18 | 8,77 | 90,9 | 2,85 | 27,1 | 1,56 | 3,04 | 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 | 3,23 | 1,42 | 18,2 | 1,38 | 0,393 |
| | | | 7 | 11,1 | 8,70 | 113,0 | 3,19 | 35,0 | 1,78 | 3,28 | 1,46 | 20,8 | 1,37 | 0,392 |
| | | | 8 | 12,6 | 9,87 | 127,0 | 3,18 | 39,2 | 1,77 | 3,32 | 1,50 | 23,4 | 1,36 | 0,392 |
| | | | 10 | 15,5 | 12,1 | 154,0 | 3,15 | 47,1 | 1,75 | 3,40 | 1,58 | 28,3 | 1,35 | 0,387 |
| 11 / 7 | 110 | 70 | 6 | 11,4 | 8,98 | 112,0 | 3,53 | 45,6 | 2,00 | 3,55 | 1,58 | 26,9 | 1,53 | 0,402 |
| | | | 8 | 13,9 | 10,9 | 172,0 | 3,51 | 54,6 | 1,98 | 3,61 | 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 | 4,01 | 1,80 | 43,4 | 1,76 | 0,407 |
| | | | 8 | 16,0 | 12,5 | 256,0 | 4,00 | 83,0 | 2,28 | 4,05 | 1,84 | 48,8 | 1,75 | 0,406 |
| | | | 10 | 19,7 | 15,5 | 312,0 | 3,98 | 100,0 | 2,26 | 4,14 | 1,92 | 59,3 | 1,74 | 0,404 |
| | | | 12 | 23,4 | 18,3 | 365,0 | 3,95 | 117,0 | 2,24 | 4,22 | 2,00 | 69,5 | 1,72 | 0,400 |
| 14 / 9 | 140 | 90 | 8 | 18 | 14,1 | 364,0 | 4,49 | 120,0 | 2,58 | 4,49 | 2,03 | 70,3 | 1,98 | 0,411 |
| | | | 10 | 22,2 | 17,5 | 444,0 | 4,70 | 146,0 | 2,56 | 4,58 | 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 | 5,19 | 2,23 | 110 | 2,20 | 0,391 |
| | | | 10 | 25,3 | 19,8 | 667,0 | 5,13 | 204,0 | 2,84 | 5,23 | 2,28 | 121 | 2,19 | 0,390 |
| | | | 12 | 30,0 | 23,6 | 784,0 | 5,11 | 239,0 | 2,82 | 5,32 | 2,36 | 142 | 2,18 | 0,388 |
| | | | 14 | 34,7 | 27,3 | 897,0 | 5,00 | 272,0 | 2,80 | 5,40 | 2,43 | 162 | 2,16 | 0,385 |
| 18 / 11 | 180 | 110 | 10 | 28,3 | 22,2 | 952 | 5,80 | 276,0 | 3,12 | 5,88 | 2,44 | 165 | 2,42 | 0,375 |
| | | | 12 | 33,7 | 26,4 | 1123 | 5,77 | 324,0 | 3,10 | 5,97 | 2,52 | 194 | 2,52 | 0,374 |
| 20 / 12,5 | 200 | 125 | 11 | 34,9 | 27,4 | 1449 | 6,45 | 446,0 | 3,58 | 6,50 | 2,79 | 264 | 2,75 | 0,392 |
| | | | 12 | 37,9 | 29,7 | 1568 | 6,43 | 482,0 | 3,57 | 6,54 | 2,83 | 286 | 2,74 | 0,392 |
| | | | 14 | 43,9 | 34,4 | 1801 | 6,41 | 551,0 | 3,54 | 6,62 | 2,91 | 327 | 2,73 | 0,390 |
| | | | 16 | 49,8 | 39,1 | 2026 | 6,38 | 617,0 | 3,52 | 6,71 | 2,99 | 367 | 2,72 | 0,388 |
| 25 / 16 | 250 | 160 | 12 | 48,3 | 37,9 | 3147 | 8,07 | 1032 | 4,62 | 7,97 | 3,53 | 604 | 3,54 | 0,410 |
| | | | 16 | 63,6 | 49,9 | 4091 | 8,02 | 1333 | 4,58 | 8,14 | 3,69 | 781 | 3,50 | 0,408 |
| | | | 18 | 71,1 | 55,8 | 4545 | 7,99 | 1475 | 4,56 | 8,23 | 3,77 | 806 | 3,49 | 0,407 |
| | | | 20 | 78,5 | 61,7 | 4987 | 7,97 | 1613 | 4,53 | 8,31 | 3,85 | 949 | 3,48 | 0,405 |

4. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

| Материал | Модули упругости, ГПа | | Температурный коэффициент, $\alpha_t \cdot 10^6$ | Коэффициент 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 дюраль | 70 | 27 | 26,0 | 0,3 | 2700 |
| Бетон | 20 | – | 0,1 | 0,16 | 2500 |
| Дерево (сосна) | 10 | – | – | – | 550 |



5. 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 |

6. ПРОЧНОСТЬ НА РАЗРЫВ РАЗЛИЧНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

| МАТЕРИАЛ | Предел прочности $\sigma_{пчр}$, МПа |
|--|--|
| МЕТАЛЛЫ | |
| Стали: – малоуглеродистая – специально для сосудов высокого давления – рояльная проволока | 400 2500 3000 |
| Чугуны: – серый – специальный | 100-400 300-600 |
| Алюминиевые сплавы | 100-600 |
| Магниеые сплавы | 100-300 |
| Латунь | 200-700 |
| Бронза | 100-800 |
| Титановые сплавы | 600-1500 |
| НЕМЕТАЛЛЫ | |
| Мышечная ткань | 0,1 |
| Цемент и бетон | 4 |
| Обычный кирпич | 5,5 |
| Дерево (сухое) – вдоль волокон – поперек волокон | 100 3,5 |
| Кость | 110 |
| Обыкновенное стекло | 35-175 |
| Человеческий волос | 190 |
| Паутина | 240 |
| Хорошая керамика | 35-350 |
| Шелк, хлопковое волокно | 350 |
| Льняное полотно | 700 |
| Нейлоновая ткань | 1050 |
| Пластики, армированные стекловолокном или углеволокном | 350-1050 |
| Искусственно выращенные кристаллы: – усы железа – графитовые нити | 13000 24000 |

7. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

| МАТЕРИАЛ | 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 | | | | | |
| 20X (40X), отжиг | 700 | 400 | 310 | 170 | 25 |
| 20X (40X), закалка | 950 | 700 | 390 | 220 | 9 |
| 12ХН3А, закалка | 1000 | 800 | 400 | 240 | 9 |
| 40X (40ХН), закалка, отпуск 600° С | 1050 | 600 | 420 | 250 | 15 |
| 12Х2МВ8ФБ (ЭИ503) | 1100 | 940 | 500 | 270 | 10 |
| 40ХНМА, закалка, отпуск 560° С | 1150 | 950 | 520 | 280 | 9 |
| 18ХГТ (18ХГМ), закалка | 1200 | 1100 | 460 | 230 | 6 |
| 40X (40ХН), закалка, отпуск 500° С | 1300 | 1000 | 580 | 320 | 10 |
| 18Х2Н4МА (18ХНВА), закалка | 1600 | 720 | 600 | 360 | 8 |
| 3ОХГСН, изотермическая закалка 330°С | 1700 | 1500 | 700 | 400 | 8 |
| 3ОХГСА, закалка | | | | | |
| 2. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ | | | | | |
| АК4, закалка, искусственное старение .. | 400 | 200 | 130 | 80 | 15 |
| Д16Т, закалка, естественное старение. . . | 500 | 340 | 140 | 120 | 8 |
| В95, закалка, искусственное 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 |

8. УДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

| Материал | | Удель- ный вес | Модуль упруго- сти | Предел текучести | Предел прочности | Удельная прочность |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| | | γ | E | $\sigma_{0,2}$ | $\sigma_{пч}$ | $\sigma_{пч} / \gamma$ |
| | | кН/м ³ | ГПа | МПа | | кМ |
| Стали | углеродистые | 78,5 | 200 | 210-480 | 350-800 | 10 |
| | легированные | | | 800-1450 | 1000-1800 | 23 |
| | сверхпрочные | | | 2250-3150 | 2500-3500 | 45 |
| Чугуны | Серые | 72 | 80 | 150-250 | 200-350 | 5 |
| | высокопроч- ные | 74 | 150 | 320-560 | 450-800 | 11 |
| Алюми- ниевые сплавы | литые | 28 | 70 | 130-175 | 180-250 | 9 |
| | деформи- руемые | | | 280-420 | 400-600 | 21,5 |
| Маг- ниевые сплавы | литые | 18 | 45 | 80-130 | 120-200 | 11 |
| | деформи- руемые | | | 160-200 | 250-300 | 16,5 |
| Конструкционные бронзы | | 88 | 110 | 320-480 | 400-600 | 7 |
| Титановые сплавы | | 45 | 110 | 700-1350 | 800-1500 | 33 |
| Конструкцион- ные пластики | дельта- древесина | 14 | 50 | – | 150-200 (вдоль слоев) | 13 |
| | стекло- волокниты | 16 | 50 | – | 250-300 | 37 |
| | СВАМ | 19 | 60 | – | 400-700 (вдоль волокон) | 37 |
| Ситаллы | | 30 | 150 | 450-720 | 500-800 | 27 |

9. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Таблица 9.1

Качественные углеродистые стали

| Марка стали ГОСТ 1050-74 | Термо-обработка* | Предел прочности при растяжении $\sigma_{пч}$ | Предел текучести σ_T | Предел выносливости при | | | Допускаемые напряжения**, МПа при | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|--|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|
| | | | | растяжении σ_{-1p} | изгибе σ_{-1} | кручении τ_{-1} | растяжении [σ_p] | | | изгибе [$\sigma_{из}$] | | | кручении [$\tau_{кр}$] | | | срезе [$\tau_{ср}$] | | | смятии [$\sigma_{см}$] | |
| | | | | | | | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II |
| | | | | | | | МПа | | | | | | I | II | III | I | II | III | I | II |
| 8 | Н | 330 | 200 | 120 | 150 | 90 | 110 | 80 | 60 | 130 | 95 | 75 | 80 | 60 | 45 | 60 | 45 | 35 | 165 | 120 |
| 10 | Н | 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 | Н | 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 | Н | 420 | 250 | 150 | 190 | 115 | 140 | 115 | 95 | 170 | 120 | 95 | 105 | 70 | 55 | 85 | 60 | 45 | 210 | 175 |
| | Ц-В58 | 500 | 300 | 180 | 225 | 135 | 165 | 115 | 90 | 200 | 140 | 110 | 125 | 75 | 55 | 100 | 60 | 45 | 240 | 175 |
| 25 | Н | 460 | 280 | 170 | 210 | 125 | 150 | 110 | 85 | 180 | 130 | 105 | 110 | 80 | 60 | 90 | 65 | 50 | 220 | 165 |
| | У | 550 | 350 | 200 | 250 | 150 | 180 | 130 | 100 | 210 | 160 | 125 | 135 | 95 | 75 | 110 | 80 | 60 | 270 | 195 |
| 30 | Н | 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 | Н | 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 | Н | 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 | Н | 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 |
| | В42 | 900-1200 | 700 | 325 | 405 | 245 | 300 | 210 | 160 | 360 | 260 | 200 | 230 | 160 | 120 | 185 | 125 | 95 | 450 | 310 |
| | В48 | 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 | 105 | 80 | 360 | 260 | |
| 50 | Н | 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 | Н | 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 | Н | 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 |

Окончание табл. 9.1

| Марка стали ГОСТ 1050-74 | Термообработка* | Предел прочности при растяжении $\sigma_{пч}$ | Предел текучести σ_T | Предел выносливости при | | | Допускаемые напряжения**, МПа при | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|--|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|
| | | | | растяжении σ_{-1p} | изгибе σ_{-1} | кручении τ_{-1} | растяжении [σ_p] | | | изгибе [$\sigma_{из}$] | | | кручении [$\tau_{кр}$] | | | срезе [$\tau_{ср}$] | | | смятии [$\sigma_{см}$] | |
| | | | | | | | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40Г | Н | 600 | 360 | 220 | 270 | 160 | 200 | 140 | 110 | 240 | 175 | 135 | 150 | 105 | 80 | 120 | 85 | 65 | 300 | 210 |
| | В45 | 840 | 590 | 350 | 380 | 230 | 280 | 190 | 150 | 330 | 240 | 190 | 210 | 150 | 115 | 170 | 120 | 95 | 420 | 290 |
| 50Г | Н | 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 | Н | 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 |
| | М45 | 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 и 2:
 0 – отжиг;
 Н – нормализация;
 У – улучшение;
 Ц – цементация;
 ТВЧ – закалка с нагревом токами высокой частоты;
 В – закалка с охлаждением в воде;
 М – закалка с охлаждением в масле;
 НВ – твердость по Бринелю.

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 (пульсационная);
 III – знакопеременная.

Таблица 9.2

Легированные стали

| Мар- ка стали ГОСТ 1050- 74 | Тер- мо- обра- ботка* | Пре- дел проч- ности при рас- тяже- нии $\sigma_{ПЧ}$ | Пре- дел те- ку- чес- ти σ_T | Предел вы- носливости при | | | Допускаемые напряжения**, МПа при | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|---|---|--|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|---------------|-----|-----|---------------|-----|-----|-----------------|-----|
| | | | | рас- тяже- нии σ_{-1p} | из- гибе σ_{-1} | кру- че- нии τ_{-1} | растяжении | | | изгибе | | | кручении | | | срезе | | | смятии | |
| | | | | | | | $[\sigma_p]$ | | | $[\sigma_{из}]$ | | | $[\tau_{кр}]$ | | | $[\tau_{ср}]$ | | | $[\sigma_{см}]$ | |
| | | | | | | | МПа | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I |
| 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 | 355 | 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 | 280 | 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 |
| 33ХС | Н | 600 | 300 | 210 | 260 | 150 | 190 | 135 | 105 | 230 | 165 | 130 | 140 | 100 | 75 | 115 | 65 | 65 | 280 | 200 |
| | М | 900 | 700 | 360 | 450 | 260 | 300 | 220 | 180 | 360 | 280 | 220 | 230 | 165 | 130 | 180 | 135 | 105 | 450 | 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 | 175 | 125 | 100 | 140 | 100 | 80 | 340 | 260 |
| | Ц-М59 | 1000 | 800 | 400 | 500 | 290 | 330 | 250 | 200 | 400 | 310 | 250 | 250 | 185 | 145 | 200 | 145 | 115 | 490 | 380 |

Окончание табл. 9.2

| Марка стали ГОСТ 1050-74 | Термообработка* | Предел прочности при растяжении $\sigma_{ПЧ}$ | Предел текучести σ_T | Предел выносливости при | | | Допускаемые напряжения**, МПа при | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|--|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|
| | | | | растяжении σ_{-1p} | изгибе σ_{-1} | кручении τ_{-1} | растяжении [σ_p] | | | изгибе [$\sigma_{из}$] | | | кручении [$\tau_{кр}$] | | | срезе [$\tau_{ср}$] | | | смятии [$\sigma_{см}$] | |
| | | | | | | | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II | III | I | II |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30ХГТ | M43 | 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 | M40 | 1300 | 1200 | 520 | 650 | 375 | 450 | 330 | 260 | 540 | 410 | 320 | 340 | 230 | 170 | 270 | 180 | 135 | 680 | 500 |
| | M50 | 1450 | 1400 | 580 | 725 | 420 | 500 | 360 | 290 | 600 | 450 | 360 | 380 | 270 | 210 | 300 | 215 | 170 | 750 | 540 |
| 40ФХА | M30 | 900 | 750 | 360 | 450 | 260 | 320 | 230 | 180 | 380 | 280 | 220 | 240 | 170 | 130 | 190 | 135 | 105 | 480 | 340 |
| | M50 | 1600 | 3130 | 640 | 800 | 480 | 550 | 410 | 320 | 660 | 500 | 400 | 410 | 310 | 240 | 330 | 240 | 195 | 820 | 610 |
| 30ХМ | M | 950 | 750 | 380 | 475 | 230 | 320 | 240 | 190 | 390 | 300 | 240 | 240 | 155 | 115 | 190 | 125 | 90 | 480 | 360 |
| 35ХМ | M,HB270 | 1000 | 850 | 400 | 500 | 290 | 340 | 250 | 200 | 410 | 310 | 250 | 260 | 185 | 145 | 200 | 130 | 950 | 520 | 380 |
| | M | 1600 | 140 | 640 | 800 | 480 | 550 | 410 | 320 | 660 | 500 | 400 | 420 | 310 | 240 | 330 | 250 | 200 | 820 | 610 |
| 40ХН | H | 780 | 460 | 310 | 390 | 225 | 260 | 195 | 160 | 310 | 240 | 195 | 190 | 140 | 110 | 155 | 115 | 90 | 390 | 290 |
| | M43 | 1200 | 100 | 480 | 600 | 345 | 410 | 310 | 240 | 490 | 370 | 300 | 310 | 220 | 170 | 250 | 175 | 135 | 620 | 460 |
| 12ХН2 | M | 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 |
| 12ХН3А | У | 950 | 700 | 380 | 470 | 270 | 320 | 240 | 190 | 380 | 280 | 230 | 240 | 175 | 140 | 190 | 140 | 110 | 480 | 300 |
| | ТВ459 | 1000 | 850 | 400 | 500 | 300 | 340 | 260 | 200 | 410 | 310 | 250 | 250 | 190 | 150 | 200 | 150 | 120 | 510 | 380 |
| 20Х2Н4А | ТВ459 | 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 | 210 | 200 | 160 | 220 | 160 | 125 | 550 | 410 |
| | M | 1300 | 1100 | 520 | 650 | 375 | 440 | 330 | 260 | 530 | 400 | 320 | 330 | 240 | 190 | 260 | 190 | 150 | 660 | 500 |
| 20ХГСА | M | 800 | 650 | 320 | 400 | 230 | 270 | 200 | 160 | 330 | 250 | 200 | 200 | 145 | 115 | 160 | 115 | 90 | 410 | 300 |
| 30ХГС | О | 600 | 360 | 240 | 300 | 170 | 200 | 150 | 120 | 240 | 185 | 150 | 150 | 110 | 85 | 120 | 90 | 70 | 300 | 220 |
| 30ХГСА | У | 1100 | 850 | 440 | 550 | 320 | 370 | 270 | 220 | 440 | 340 | 270 | 210 | 200 | 160 | 220 | 160 | 125 | 550 | 410 |
| | M46 | 1500 | 300 | 600 | 750 | 430 | 510 | 380 | 300 | 620 | 470 | 380 | 390 | 270 | 210 | 310 | 220 | 170 | 760 | 570 |
| 38Х210 | M | 800 | 700 | 320 | 400 | 230 | 280 | 200 | 160 | 330 | 250 | 200 | 200 | 150 | 115 | 170 | 120 | 95 | 410 | 300 |
| | M | 900 | 750 | 360 | 450 | 260 | 310 | 240 | 190 | 370 | 290 | 240 | 230 | 170 | 135 | 185 | 140 | 110 | 460 | 360 |
| 50ХФА | M | 1300 | 100 | 520 | 650 | 340 | 440 | 330 | 260 | 540 | 400 | 320 | 340 | 220 | 170 | 260 | 180 | 135 | 660 | 500 |
| | M46 | 1500 | 300 | 600 | 750 | 360 | 520 | 380 | 300 | 620 | 470 | 380 | 390 | 240 | 180 | 310 | 200 | 145 | 770 | 570 |
| 60С2 | M,HB269 | 1300 | 1200 | 520 | 650 | 340 | 440 | 330 | 260 | 540 | 400 | 320 | 340 | 220 | 170 | 260 | 180 | 135 | 670 | 550 |
| 60С2А | M,HB269 | 1600 | 1600 | 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 |
| | M62 | 2200 | 1700 | 460 | 660 | 330 | 740 | 350 | 230 | 890 | 480 | 330 | 550 | 250 | 165 | 440 | 200 | 130 | 100 | 520 |

** Римскими цифрами обозначен вид нагрузки, см. таблицу 9.1.

10. ДАННЫЕ К РАСЧЕТАМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Таблица 10.1

Коэффициенты продольного изгиба φ (увеличенные в 1000 раз)

| Материалы | Гибкость λ | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 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, 3, 4 | 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, 28 | 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 |

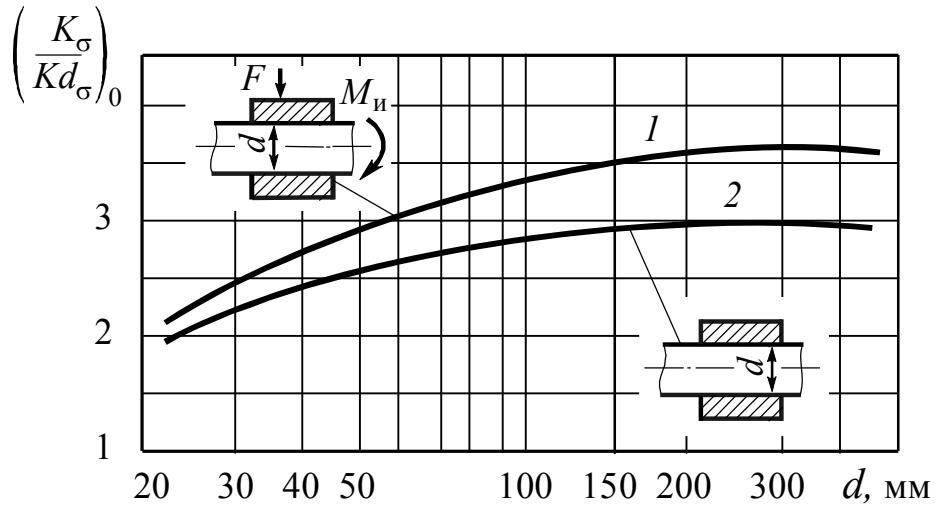
Таблица 10.2

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

| № п/п | Материал | E , ГПа | a | b | c | $\lambda_{\text{пц}}$ (λ_1) | $\lambda_{\text{пред}}$ (λ_2) |
|-------|------------------|--------------|-----|-------|-------|--|--|
| | | | МПа | | | | |
| 1 | Сосна | 10 | 40 | 0,203 | – | 60 | – |
| 2 | Сталь СтЗ | 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 | Чугун | 120 | 776 | 12 | 0,053 | 80 | – |

11. ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Валы с напрессованными деталями при изгибе



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

1 – через напрессованную деталь передается сила или момент;

2 – через напрессованную деталь не передается усилие

Поправочный коэффициент ξ'
на предел прочности $\sigma_{пч}$

Поправочный коэффициент ξ''
на давление напресовки p

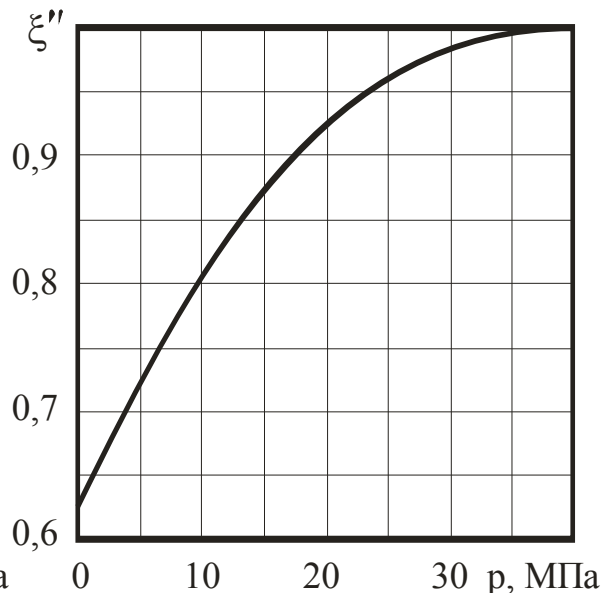
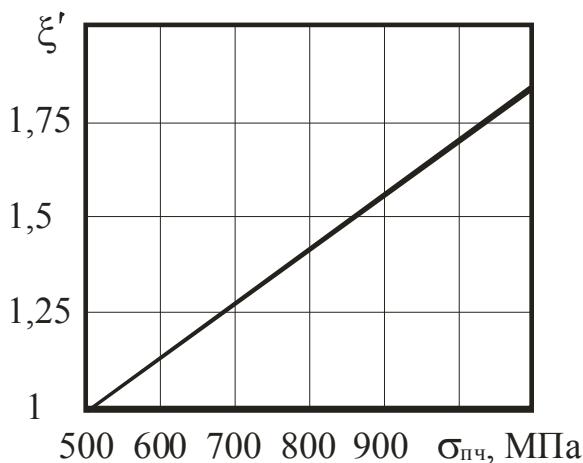


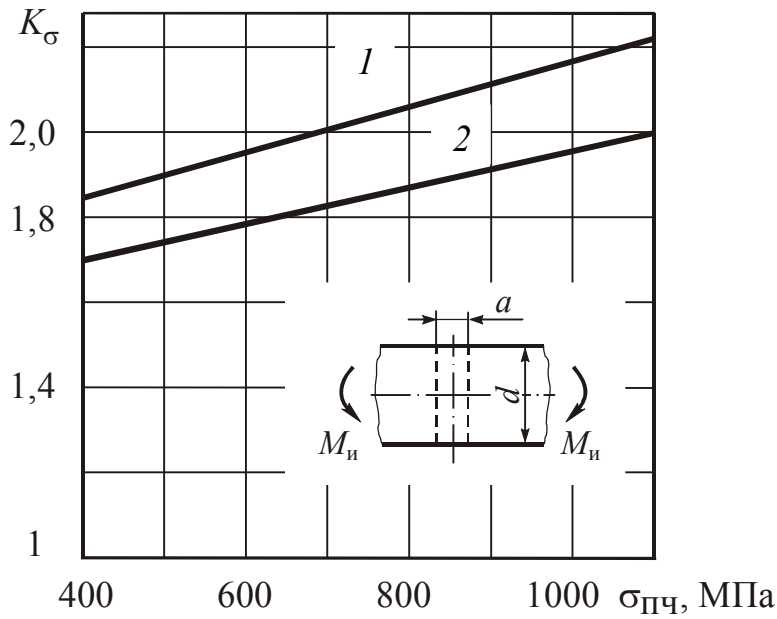
Рис. 11.1

Таблица 11.1

**Линейная протяженность очага концентрации
и относительный градиент напряжений**

| Деталь | L, мм | Вид деформации | | |
|--------|----------|--|----------------------------|--|
| | | изгиб | растяжение и сжатие | кручение $\bar{G}_\tau, \text{мм}^{-1}$ |
| | | $\bar{G}, \text{мм}^{-1}$ | | |
| | 2b | $H/h \geq 1,5$ | | — |
| | | $2/r + 2/h$ | $2/r$ | |
| | | $H/h < 1,5$ | | |
| | | $\frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{h}$ | $\frac{2(1+\varphi)}{r}$ | |
| | πd | $D/d \geq 1,5$ | | $\frac{1}{r} + \frac{2}{d}$ |
| | | $2/r + d$ | $2/r$ | |
| | | $D/d < 1,5$ | | |
| | | $\frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d}$ | $\frac{2(1+\varphi)}{r}$ | |
| | 2b | $H/h \geq 1,5$ | | — |
| | | $2,3/r + 2/h$ | $2,3/r$ | |
| | | $H/h < 1,5$ | | |
| | | $\frac{2,3(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{h}$ | $\frac{2,3(1+\varphi)}{r}$ | |
| | πd | $D/d \geq 1,5$ | | $\frac{1,15}{r} + \frac{2}{d}$ |
| | | $2,3/r + 2/d$ | $2,3/r$ | |
| | | $D/d < 1,5$ | | |
| | | $\frac{2,3(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d}$ | $\frac{2,3(1+\varphi)}{r}$ | |
| | 2b | — | $\frac{2,3}{r}$ | — |

Примечание. Для случаев, указанных в таблице $\varphi = \frac{1}{2 + 4\sqrt{t/r}}$, где $t = \frac{H-h}{2}$ или $t = \frac{D-d}{2}$

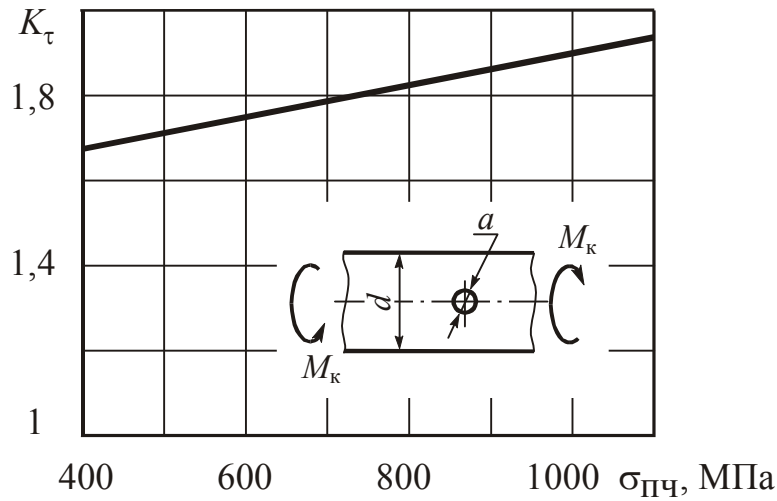


$$1 - a/d = 0,05 - 0,10$$

$$2 - a/d = 0,15 - 0,25$$

$$\sigma_H = \frac{M_H}{W_{\text{нетто}}}$$

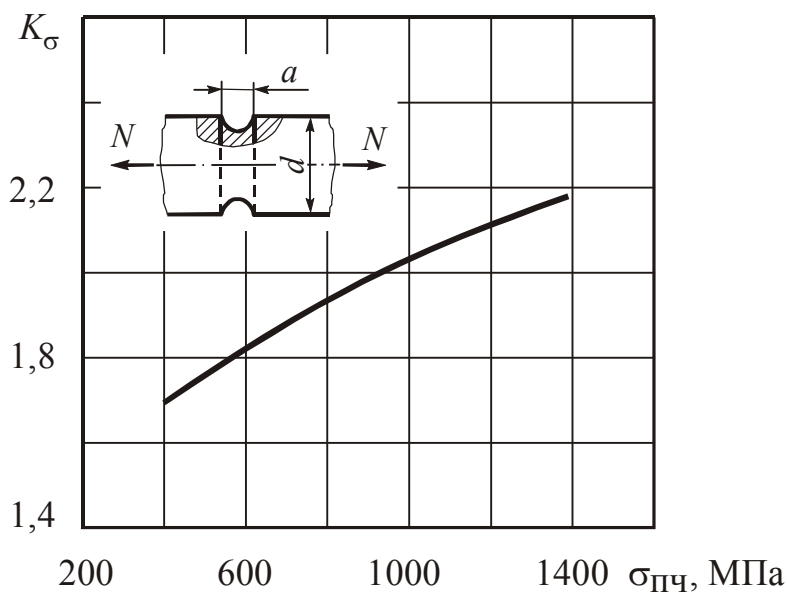
при $d = 30 - 50$ мм



$$a/d = 0,15 - 0,25$$

$$\tau_H = \frac{M_K}{W_{\text{нетто}}}$$

при $d = 30 - 50$ мм

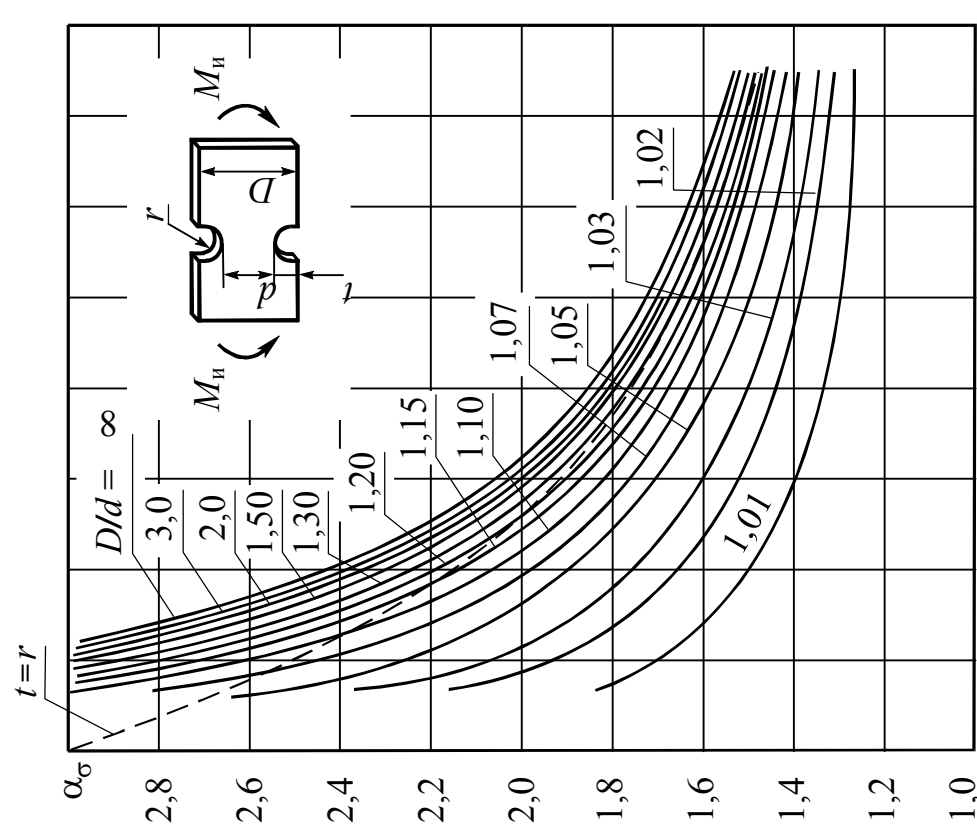
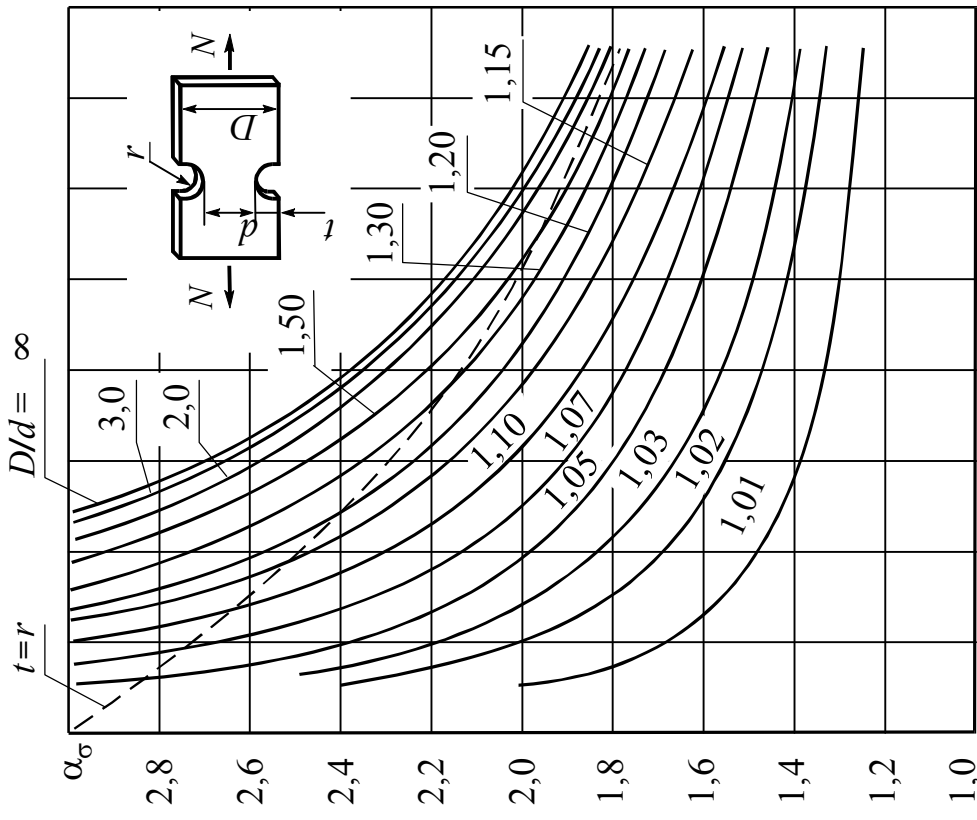


$$a/d = 0,20 - 0,45$$

$$\sigma_H = \frac{N}{\frac{\pi d^2}{4} - ad}$$

$d = 15$ мм

Рис. 11.2



0 0,04 0,08 0,12 0,16 0,20 0,24 0,28 d/D 0 0,04 0,08 0,12 0,16 0,20 0,24 0,28 r/d

Пунктирная линия $t = r$ полуокружность $r/d = 0,02$ 0,30

Рис. 11.3

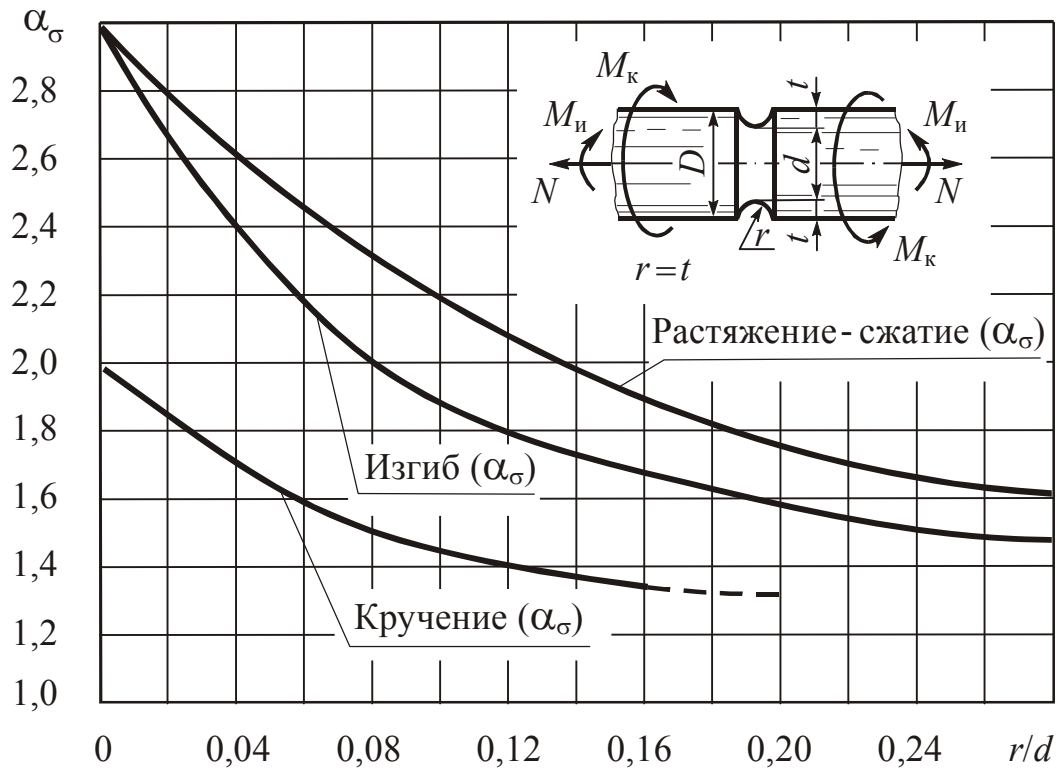


Рис. 11.4

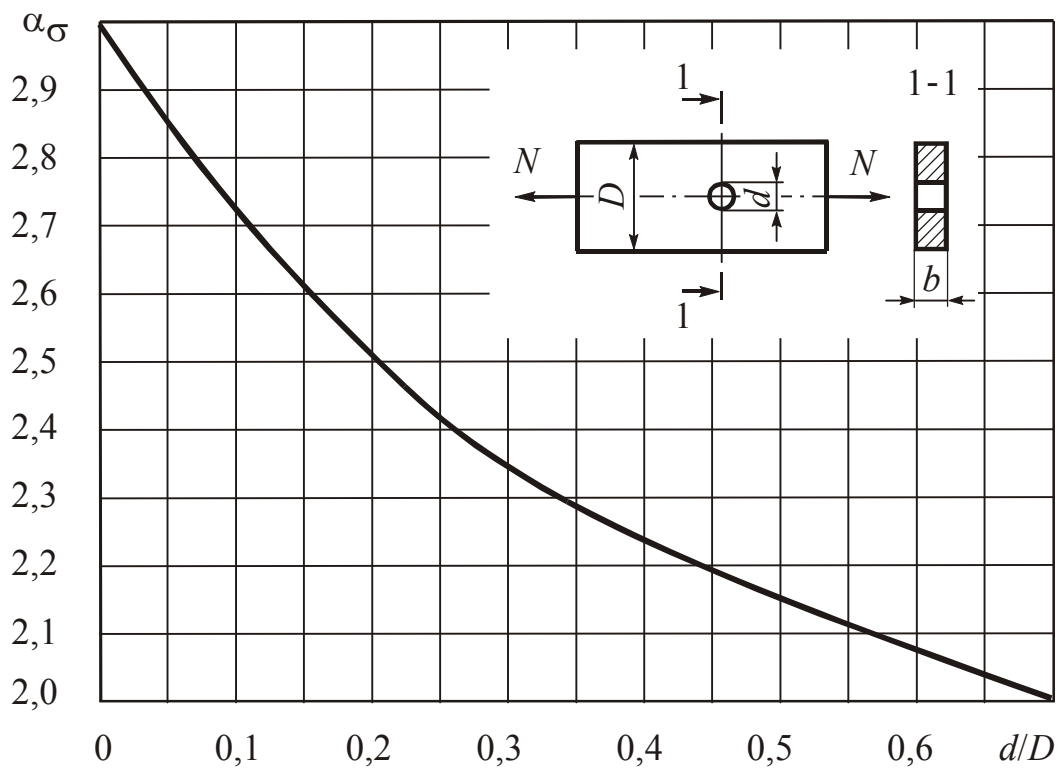


Рис. 11.5

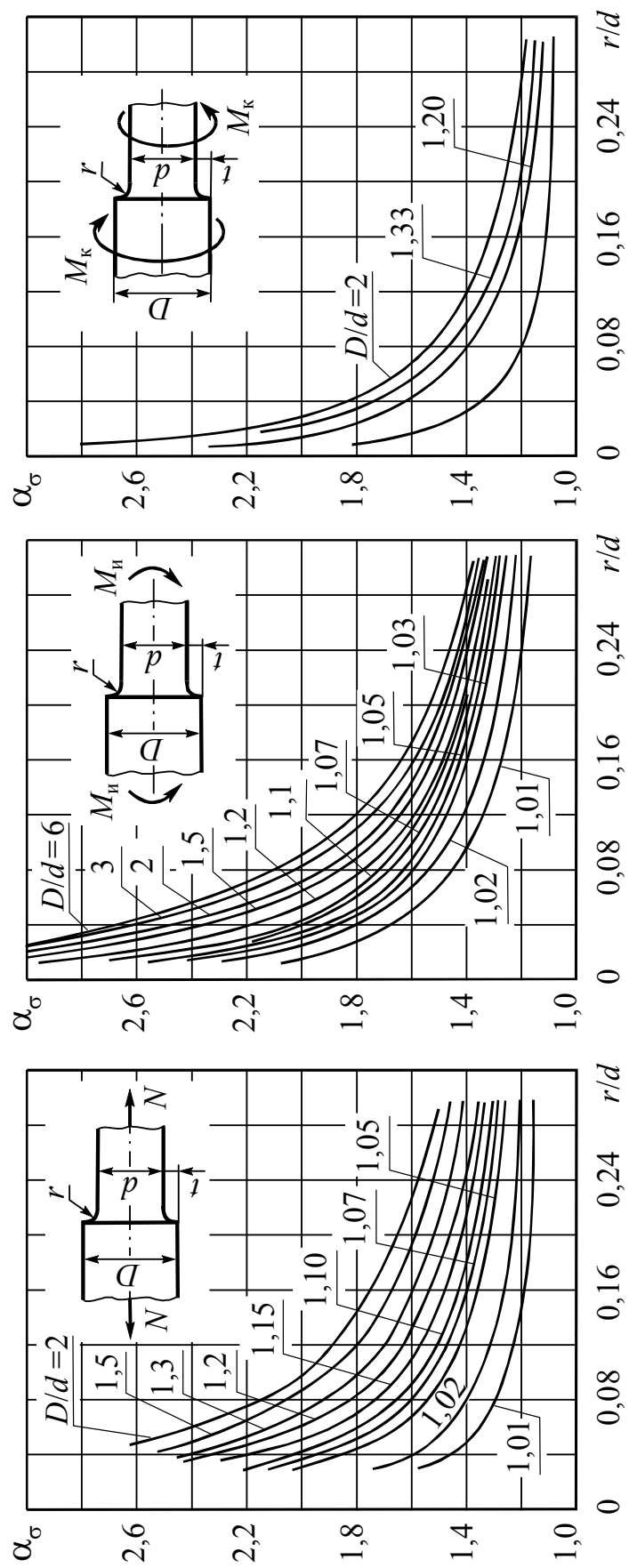


Рис. 11.6

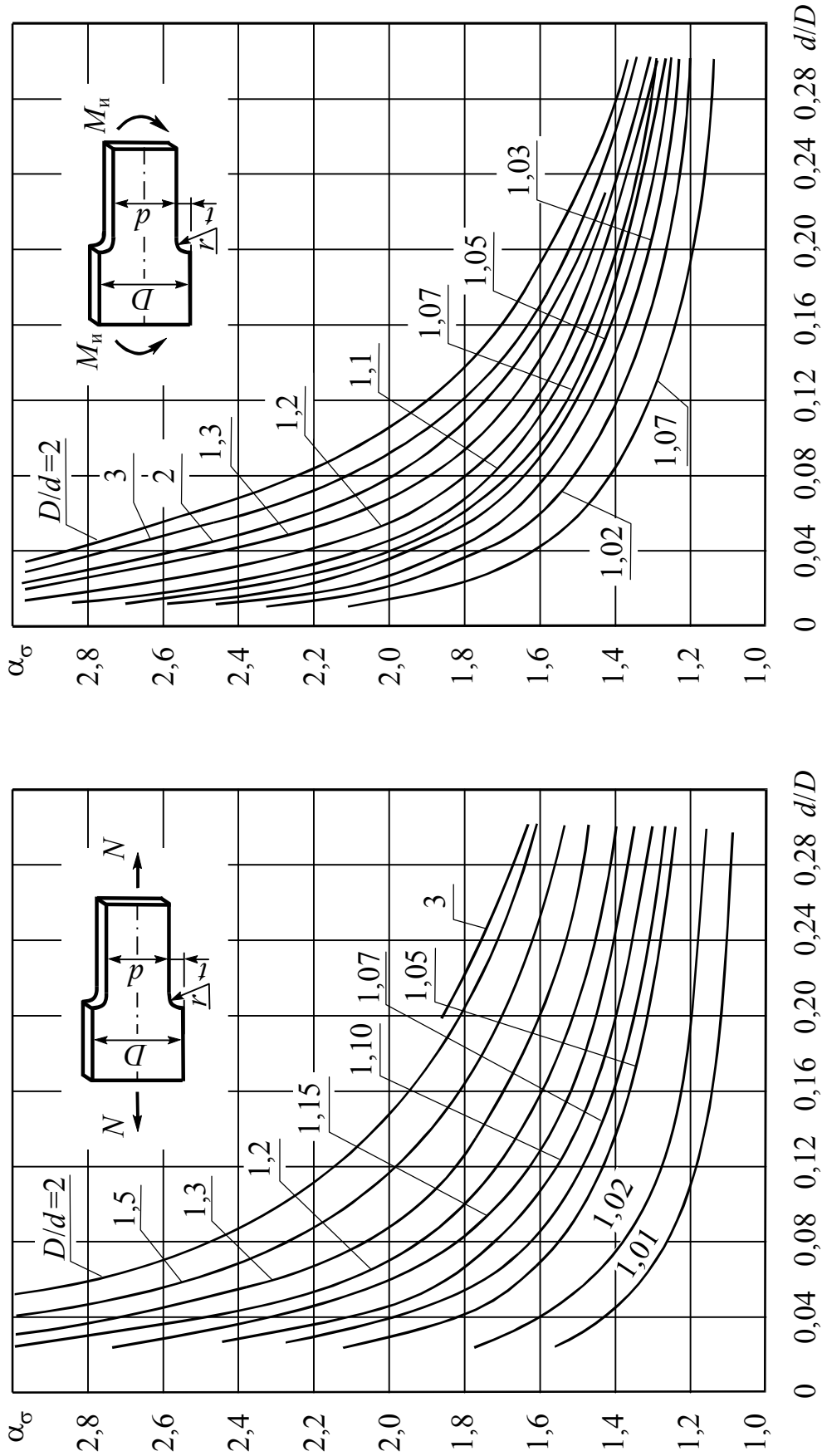


Рис. 11.7