

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
1. Математика	1-9
2. Сопротивление материа- лов	10-22
3. Валы и оси	23-37
4. Сварные соединения	38-40
5. Подшипники качения	41-44
6. Подшипники скольжения	45
7. Резьбовые соединения	46-49
8. Пружины	50-54
9. Зубчатые передачи	55-66
10. Смазка	67-69
11. Тепловые расчеты	70-77
12. Техническая механика	78-95
13. Коэффициент трения	96-100
14. Электропривод	101-106
15. Международная система единиц	107-111

МАТЕМАТИКА

1. Основные ф-лы тригонометрии

а) Функции одного угла

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \quad \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \operatorname{ctg} \alpha$$

б) Выражение одной функции через другую*

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha} = \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha}$$

* В этих формулах перед знаком радикала должен быть знак „плюс“ или „минус“ в зависимости от того в какой четверти находится угол.

б) Функции суммы и разности углов

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta}{1 \mp \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

г) Функции кратных углов

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

д) Функции половинного угла *

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}, \quad \cos \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha}$$

* см. сноску на стр. 1

е) Сумма и разность функций

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha \pm \operatorname{ctg} \beta = \pm \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cdot \sin \beta}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \beta = \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cdot \cos \beta}$$

2. Основные ф-лы гиперболической тригонометрии

а) Определение гиперболических функций

$$\operatorname{sh} x = 0,5(e^x - e^{-x}), \operatorname{ch} x = 0,5(e^x + e^{-x})$$

$$\operatorname{th} x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad \operatorname{cth} = \frac{1}{\operatorname{th} x}$$

б) Функции одного аргумента

$$\operatorname{ch}^2 x - \operatorname{sh}^2 x = 1 \quad \operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x}$$

$$(\operatorname{ch} x \pm \operatorname{sh} x)^n = \operatorname{ch} nx \pm \operatorname{sh} nx$$

б) функции суммы и разности двух аргументов

$$\operatorname{sh}(x \pm y) = \operatorname{sh} x \cdot \operatorname{ch} y \pm \operatorname{ch} x \cdot \operatorname{sh} y$$

$$\operatorname{ch}(x \pm y) = \operatorname{ch} x \cdot \operatorname{ch} y \pm \operatorname{sh} x \cdot \operatorname{sh} y$$

$$\operatorname{tg}(x \pm y) = \frac{\operatorname{th} x \pm \operatorname{th} y}{1 \pm \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tg} y}$$

г) функции двойного аргумента

$$\operatorname{sh} 2x = 2 \operatorname{sh} x \cdot \operatorname{ch} x, \operatorname{ch} 2x = \operatorname{sh}^2 x + \operatorname{ch}^2 x$$

$$\operatorname{th} 2x = \frac{2 \operatorname{th} x}{1 + \operatorname{th}^2 x}$$

д) Сумма и разность функций

$$\operatorname{sh} x \pm \operatorname{sh} y = 2 \operatorname{sh} \frac{x \pm y}{2} \operatorname{ch} \frac{x \mp y}{2}$$

$$\operatorname{ch} x + \operatorname{ch} y = 2 \operatorname{ch} \frac{x+y}{2} \operatorname{ch} \frac{x-y}{2}$$

$$\operatorname{ch} x - \operatorname{ch} y = 2 \operatorname{sh} \frac{x+y}{2} \operatorname{sh} \frac{x-y}{2}$$

$$\operatorname{th} x \pm \operatorname{th} y = \frac{\operatorname{sh}(x \pm y)}{\operatorname{ch} x \cdot \operatorname{sh} y}$$

е) функции половинного угла

$$\operatorname{sh} \frac{x}{2} = \pm \sqrt{\frac{\operatorname{ch} x - 1}{2}} \left(\begin{array}{l} \text{"+" при } x > 0 \\ \text{"-" при } x < 0 \end{array} \right)$$

$$\operatorname{ch} \frac{x}{2} = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} x + 1}{2}} \quad \operatorname{th} \frac{x}{2} = \frac{\operatorname{ch} x - 1}{\operatorname{sh} x} = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x + 1}$$

3. Основные соотношения в треугольниках

а) Принятые обозначения

a, b, c – стороны; A, B, C – противоположные им углы; S – площадь;
 R – радиус описанной окружности;
 r – радиус вписанной окружности;
 $P = 0,5(a+b+c)$ – полупериметр

б) Основные соотношения

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} \quad (\text{теорема синусов})$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A \quad (\text{теорема косинусов})$$

$$\frac{a+b}{a-b} = \frac{\operatorname{tg} 0,5(A+B)}{\operatorname{tg} 0,5(A-B)} \quad (\text{теорема тангенсов})$$

$$S = 0,5ab \sin C = 2R^2 \sin A \cdot \sin B \cdot \sin C =$$

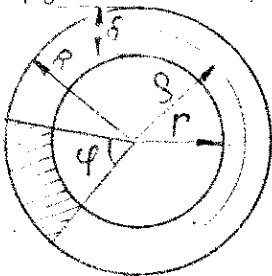
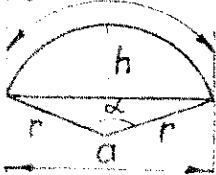
$$= rp = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$$

$$A+B+C = 180^\circ$$

$$R = \frac{p}{4 \cos(A/2) \cos(B/2) \cos(C/2)}$$

$$r = p \operatorname{tg}(A/2) \operatorname{tg}(B/2) \operatorname{tg}(C/2)$$

4. Вычисление площадей и периметров круга и его элементов

Геометрическая фигура и обозначения	Ф-лы вычисления периметров (ℓ) и площадей (S)
<p>Круг</p> <p>R-радиус</p> <p>$D=2R$</p>	$\ell = 2\pi R = \pi D$ $S = \pi R^2 = 0,25\pi D^2$
<p>Круговое кольцо</p> 	$S = \pi(R^2 - r^2) =$ $= 0,25\pi(D^2 - d^2) = 2\pi\rho\delta$ $\rho = \frac{R+r}{2}; \delta = R-r$ <p>$D=2R; d=2r$</p> <p>Площадь части кольца (заштрихована)</p> $S_1 = \frac{\varphi\pi}{90}(D^2 - d^2) = \frac{\varphi\pi}{180}\rho\delta$
<p>Круговой сектор</p> 	$S = \frac{\pi r^2 \alpha}{360}$ $h = r - \sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}} = r(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4}$ $\ell = \frac{\pi r \alpha}{180}$
<p>Круговой сегмент (обозначения см. для кругового сектора)</p>	$S = \frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right) =$ $= \frac{1}{2} [\ell r - a(r - h)]$

Разложение функции в степенные ряды

Функция	Разложение в ряд
$(1 \pm x)^m$ $m > 0$ $ x \leq 1$	$1 \pm mx + \dots + (\pm 1)^n \frac{m(m-1)\dots(m-n+1)}{n!} x^n + \dots$
$(1 \pm x)^{-m}$ $m > 0$ $ x < 1$	$1 \mp mx + \dots + (-1)^n \frac{m(m+1)\dots(m+n-1)}{n!} x^n + \dots$
$\sin x$ $ x < \infty$	$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \pm \dots$
$\cos x$ $ x < \infty$	$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} \pm \dots$
a^x $ x < \infty$	$1 + \frac{x \ln a}{1!} + \frac{(x \ln a)^2}{2!} + \dots + \frac{(x \ln a)^n}{n!} + \dots$
$\ln x$ $x > 0$	$2 \left[\frac{x-1}{x+1} + \frac{(x-1)^3}{3(x+1)^3} + \dots + \frac{(x-1)^{2n+1}}{(2n+1)(x+1)^{2n+1}} + \dots \right]$
$\ln x$ $x > \frac{1}{2}$	$\frac{x-1}{x} + \frac{(x-1)^2}{2x^2} + \dots + \frac{(x-1)^n}{nx^n} + \dots$
$\ln(1+x)$ $-1 < x \leq 1$	$x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n} \pm \dots$
$\ln(1-x)$	$-\left[x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots + \frac{x^n}{n} + \dots \right]$

6. Производные элементарных функций

Функция	Производная	Функция	Производная
x	1	$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
x^n	nx^{n-1}	$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x^n}$	$-\frac{n}{x^{n+1}}$	$\operatorname{arctg} x$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n\sqrt[n]{x}}$	$\operatorname{arcc} \operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{1+x^2}$
e^x	e^x	$\operatorname{sh} x$	$\operatorname{ch} x$
a^x	$a^x \ln a$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{sh} x$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$	$\operatorname{th} x$	$\frac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$
$\log_a x$	$\frac{1}{x} \log_a e$	$\operatorname{cth} x$	$-\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$
$\sin x$	$\cos x$	$\operatorname{Arsh} x$	$\frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$
$\cos x$	$-\sin x$	$\operatorname{Arch} x$	$\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$
$\operatorname{tg} x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\operatorname{Arth} x$	$\frac{1}{1-x^2}$
$\operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$	$\operatorname{Arcth} x$	$\frac{1}{x^2-1}$

7. Основные интегралы *

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} (n \neq -1)$$

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x|$$

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

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

$$\int \sinh x dx = \cosh x$$

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

$$\int \cosh x dx = \sinh x$$

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

$$\int \operatorname{th} x dx = \ln|\cosh x|$$

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

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

$$\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \operatorname{arcsin} \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{a^2 - x^2} = \frac{1}{a} \operatorname{Arth} \frac{x}{a} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{a+x}{a-x} \right| (|x| < a)$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \operatorname{Arsh} \frac{x}{a} = \ln|(x + \sqrt{x^2 + a^2})|$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = -\frac{1}{a} \operatorname{Arcth} \frac{x}{a} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| (|x| > a)$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 - a^2}} = \operatorname{Arch} \frac{x}{a} = \ln|(x + \sqrt{x^2 - a^2})|$$

* Постоянные интегрирования опущены

Сопротивление материалов

Основные обозначения

АиВ - опорные реакции	Н
d и D - диаметр вала	см, м
E - модуль продольной упругости	Па, МПа
F - площадь поперечного сечения	см ² , м ²
f - стрела прогиба	см, м
G - модуль сдвига	Па, МПа
J - осевой момент инерции	см ⁴ , м ⁴
J _p - полярный момент инерции	см ⁴ , м ⁴
l - длина пролета	см, м
L - внешний момент	Н·м
n - запас прочности	
M - изгибающий момент	Н·м
M _к - крутящий момент	Н·м
P - сосредоточенная сила	Н
p - нагрузка на единицу длины	Н/м
q - нагрузка на единицу площади	Н/м ²
Q - поперечная сила	Н
W - момент сопротивления изгибу	см ³ , м ³
W _p - момент сопротивления кручению	см ³ , м ³
U - потенциальная энергия деформ.	Дж
ε - относительная продольная деформация	
μ - коэффициент Пуассона	
γ - относительный сдвиг	

Основные характеристики некоторых материалов [1]

Материал	μ	E [МПа]	G [МПа]
Сталь	0,25-0,30	$2,1 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$
стальное литье	0,24-0,28	$1,8 \cdot 10^5$	—
чугун	0,23-0,27	$(1,2-1,6) \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^4$
бронза	0,32-0,35	$1,1 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$
латунь	0,32-0,42	$1,0 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^4$
дюралюминий катаный	0,32-0,36	$0,7 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$
дерево бревно болокон	—	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$

Растяжение и сжатие

Нормальное напряжение $\sigma = \frac{P}{F}$

Закон Гука $\sigma = E \cdot \epsilon$

Абсолютное удлинение $\Delta L = \frac{PL}{E \cdot F}$

Потенциальная энергия $U = \frac{\rho^2 \cdot L}{2EF}$

Сдвиг

Касательное напряжение $\tau = \frac{Q}{F}$

Закон Гука $\tau = G \cdot \gamma$

Модель сдвига $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$


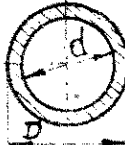
Потенциальная энергия $U = \frac{Q^2 \cdot L}{2G \cdot F}$

Кручение

Касательное напряжение $\tau = \frac{M_k}{W_p}$

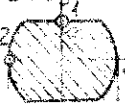



Угол закрутки вала на длине l (в градусах) $\varphi = 57,3 \frac{M_k \cdot l}{G J_p}$

Потенциальная энергия $U = \frac{M_k^2 \cdot l}{2 G J_p}$

<p>Круг</p>  $J_p = \frac{\pi d^4}{32} \approx 0,1 d^4$ $W_p = \frac{\pi d^3}{16} \approx 0,2 d^3$	<p>Кольцо</p>  $J_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$ $W_p = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{16 D}$
--	--

Кручение стержней некруглого поперечного сечения [3] [4]

Касательное напряжение $\tau = \frac{M_k}{W_k}$

<p>Круглое сечение с двумя лысками</p>  $W_{k1} = 0,186 D^2 s$ $W_{k2} = 0,214 D^2 s$ <p style="text-align: center;">D</p> <p>Равносторонний треугольник</p>  $J_k = 46,19 \frac{h^4}{12} = 25,98 \frac{h^4}{12}$ $W_k = 0,058 \frac{h^3}{12} = 2,93 \frac{h^3}{12}$	<p>Квадратное сечение</p>  $J_k = 0,1406 a^4$ $W_k = 0,208 a^3$ <p style="text-align: center;">a</p> <p>Сектор</p>  $\delta \leq \frac{\pi}{6}$ $J_k = \frac{2}{3} \pi r \delta^3$ $W_k = \frac{(2 \pi r \delta)^2}{6 \pi + 1,85}$
---	--

Геометрические характеристики сечений [2]

Момент инерции сечения относительно оси „хх“ параллельной оси „оо“, проходящей через центр тяжести

$$J_{xx} = J_{oo} + F \cdot r^2$$

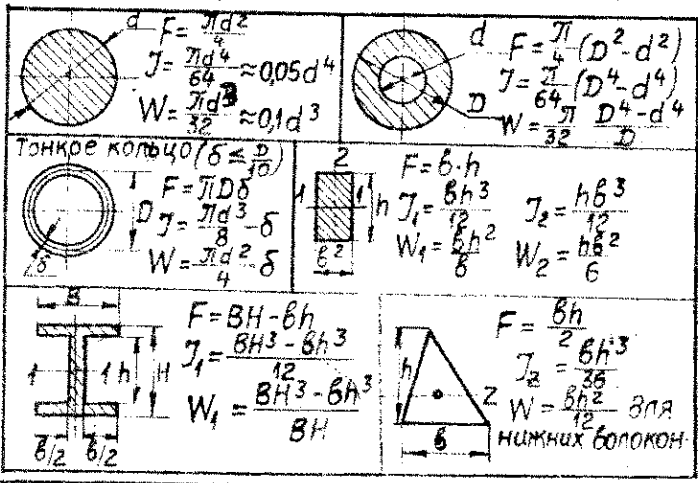
где F - площадь поперечного сечения

r - расстояние от оси до ц.т. сечения

Момент инерции сложной фигуры

$$J = J_1 + J_2 + \dots + J_n,$$

где J_1, J_2, J_n - моменты инерции отдельных частей фигуры относительно одной оси

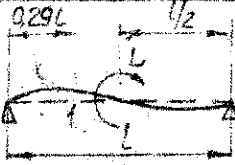
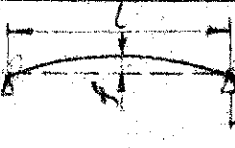
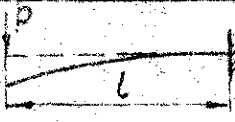
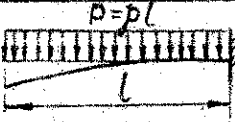
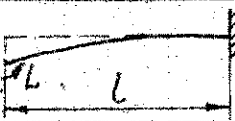
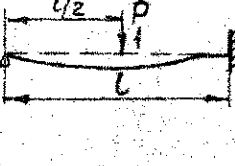



Поперечный изгиб [2]

Нормальное напряжение $\sigma = \frac{M}{W}$

Потенциальная энергия при чистом изгибе $U = \frac{M^2 L}{2EI}$

	$A=B=0,5P$ $M = \frac{PL}{4} (B_1)$	$f = \frac{PL^3}{48EI} (B_1)$
	$A = P \frac{b}{L}$ $B = P \frac{a}{L}$ $M = P \frac{ab}{L} (B_1)$	$f \approx \frac{Pa}{48EI} \times$ $\times (3L^2 - 4a^2)$ при $a < b$
	$A=B=0,5P$ $M = \frac{pL^2}{8} \text{ (при } x = \frac{L}{2})$	$f = \frac{5}{384} \frac{pL^4}{EI}$ (при $x = \frac{L}{2}$)
	$A = \frac{pc}{L} (b + \frac{1}{2}c)$ $B = \frac{pc}{L} (a + \frac{1}{2}c)$ $M = \frac{pc}{L} (a + \frac{cd}{2})$ при $x = a + \frac{cd}{2}$	$\theta = \frac{pcL^2}{24EI} [\frac{4}{3} \frac{d}{L} -$ $- 4 \frac{a^3}{L^3} + \frac{ac^2}{L^3} +$ $+ \frac{1}{2} \frac{c^3}{L^3} - \frac{c^2}{L^2}] (BA)$
	$A=B=P$ $M = P \cdot a$	$f \approx \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2)$
	$A=B = \frac{L}{L}$ $M = L (BA)$	$f = 0,064 \frac{L^2}{EI}$ (B1)

	$-A=B=\frac{L}{L}$ $M=0,5L$	$f_1 \approx 0,008 \frac{LL^2}{EJ}$
	$A = -\frac{PC}{L(l+0)}$ $B = \frac{P(l+0)}{L}$ $M = P \cdot C (BB)$	$f = 0,0642 \frac{PCl^2}{EJ}$ <p>(npux=0,578L)</p> $f_1 = \frac{P}{EJ} \frac{(l+c)c^2}{3}$
	$B = P$ $M = P \cdot L (BB)$	$f = \frac{PL^3}{3EJ} (BA)$
	$B = P = pL$ $M = \frac{pL}{2} (BB)$	$f = \frac{pL^3}{8EJ}$
	$B = 0$ $M = L$	$f = \frac{LL^2}{2EJ} (BA)$
	$A = \frac{5}{16} P$ $B = \frac{11}{16} P$ $M = \frac{3}{16} PL (BB)$ $M = \frac{5}{32} PL (BA)$	$f = 0,0093 \frac{PL^3}{EJ}$ <p>npux=0,447L</p>
	$A = \frac{3}{8} P$ $B = \frac{5}{8} P$ $M = \frac{pL}{8} (BB)$	$f = 0,0054 \frac{pL^3}{EJ}$ <p>npux=0,421L</p>

	$A = B = 0,5P$ $M = \frac{PL}{8} (BAuB)$	$f = \frac{PL^3}{192EJ} (61)$
	$A = B = 0,5P$ $M = \frac{PL}{24} (\text{при } x = \frac{L}{2})$ $M = \frac{PL}{12} (BAuB)$	$f = \frac{PL^3}{384EJ}$ $(\text{при } x = \frac{L}{2})$
	$-A = B = \frac{3}{2} \frac{L}{L}$ $M = \frac{L}{4} (BB)$ $M = -\frac{L}{4} (BA)$	$f = \frac{LL^2}{216EJ}$
<p>Осадка свободной опоры на 1 см</p>	$A = -\frac{3EJ}{L^3}$ $B = \frac{3EJ}{L^3}$ $M = \frac{3EJ}{L^3} (BB)$	$f = 1 (BA)$

Касательные напряжения при изгибе балок [2]

	$\tau_{max} = \frac{3Q}{2bh}$ $\sigma_1 = \frac{M \cdot h}{2J_x}$ $\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau_1^2}$
$\tau_{max} = 1,7 \frac{Q}{d^2}$	$\tau_x = 1,5 \frac{Q}{\delta} \frac{bH^2 - bh^2}{bH^3 - bh^3}$ $\tau_1 = 1,5 \frac{Q}{\delta} \frac{b(H^2 - h^2)}{bH^3 - bh^3}$

Продольный изгиб [4]

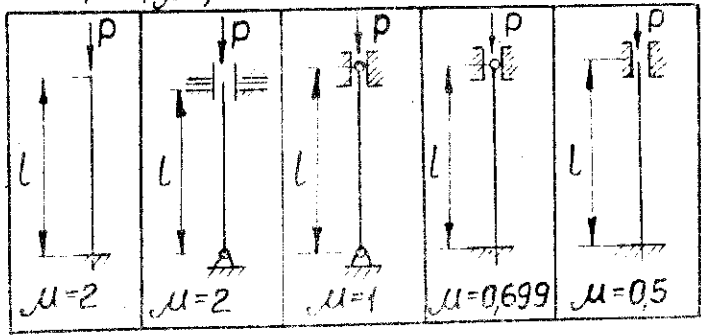
Радиус инерции $i = \sqrt{\frac{y}{F}}$

Гибкость стержня $\lambda_{max} = \frac{\mu l}{i}$

μ -коэффициент приведенной длины

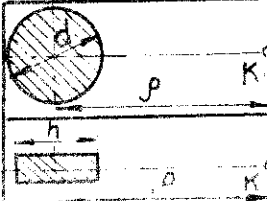
Критическая сила по Эйлеру


$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E J}{(\mu l)^2} \text{ при } \lambda > 200$$



Брус большой кривизны ($\frac{P}{h} \leq 5$) [2][5]

Нормальное напряжение на внутренней волокне $\sigma = \pm \left(K_b \frac{M}{W} + \frac{P}{F} \right)$


	P/d	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
	K_b	1.6	1.36	1.26	1.17	1.12	1.09	1.08
	P/h	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
	K_b	1.53	1.29	1.21	1.12	1.09	1.06	1.05



$$M_A = P \cdot R_0$$

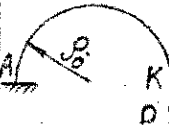
$$\delta_y = 0,785 \frac{P R_0^3}{EJ} (\text{в т. К})$$

$$\delta_x = 0,5 \frac{P R_0^3}{EJ} (\text{в т. К})$$




$$M_A = P \cdot R_0$$

$$\delta_x = 0,356 \frac{P R_0^3}{EJ} (\text{в т. К})$$



$$M_A = 2P R_0$$

$$\delta_y = 0,474 \frac{P R_0^3}{EJ} (\text{в т. К})$$




$$M_A = 0,318 P R_0$$

$$M_B = -0,182 P R_0$$

$$\delta_x = 0,137 \frac{P R_0^3}{EJ}$$


$$\delta_y = -0,149 \frac{P R_0^3}{EJ}$$



$$\max(+M) = \frac{P R_0}{2} \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{\theta} \right) \text{ при } 0,2\theta, 4\theta \text{ и т.д.}$$

$$S = \sin \theta$$

$$\max(-M) = -\frac{P R_0}{2} \left(\frac{1}{\theta} - \cot \theta \right) \text{ под каждым грузом}$$



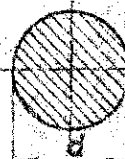
В стойке

$$M_0 = \frac{P l_1}{4} \cdot \frac{1}{2 \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{J_1}{J_2} \right)}$$

В поперечине

$$M_{\max} = \frac{P l_1}{4} - M_0$$

Предельная несущая способность балок [4]




При изгибе

$$W_{\text{пл}} = \frac{d^3}{6} = 1,7W$$


При кручении

$$W_{\text{кпл}} = 0,26 d^3 = 1,3W_0$$



$$W_{\text{пл}} = \frac{b h^2}{4} = 1,5W$$

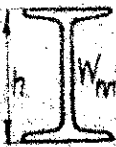
$$W_{\text{кпл}} = \frac{b^2 h}{6} (3h - b)$$



$$W_{пл} = \frac{1}{6}(d_n^3 - d_{вн}^3) \approx d^2 \delta$$

$$d = \frac{d_{вн}}{d_n}$$

$$W_{кпл} = \frac{\pi d_n^3}{12}(1 - d^3)$$



$$W_m \approx (1,14 - 1,18) W$$

Толстостенные цилиндры [2]

Главные нормальные напряжения по формулам Ляме

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) r^2}$$

p_1, p_2 - внутреннее и наружное давление;
 r_1, r_2 - внутренний и наружный радиусы;
 r - текущий радиус

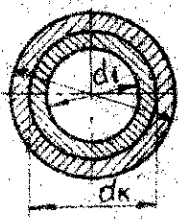
При $p_2 = 0$

$$\sigma_r = \frac{p r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{экр} = p \frac{2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

Составные цилиндры [2]

Контактное давление
 (длина и материал деталей
 одинаковы)



$$p_k = \frac{E \delta}{1 + K_1^2 + \frac{1 + K_2^2}{1 - K_2^2}}$$

$$K_1 = \frac{d_1}{d_k}; \quad K_2 = \frac{d_k}{d_2}$$

Если внутренняя деталь - сплошной цилиндр $p_k = \frac{E\delta(1-\mu_k^2)}{2d_k}$

Усилие запрессовки $P = p_k \cdot \pi \cdot d_k \cdot l \cdot f$
 где l - длина поверхности запрессовки
 f - коэффициент трения

Крутящий момент, при котором начинается взаимное проворачивание деталей $M_k = 0,5 p_k \cdot \pi \cdot d_k^2 \cdot l \cdot f$

Тонкостенные оболочки ($h \leq 0,05R$) [2]

Цилиндрическая жесткость $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$

w - перемещение по нормали к поверхности; R - радиус срединной поверхности

$$K = \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2}}$$

Длинная цилиндрическая оболочка с дншами. Равномерное внутреннее (внешнее) давление

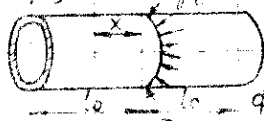


Вдали от краев

$$\sigma_x = \frac{pR}{2h}; \quad \sigma_y = \frac{pR}{h} = \sigma_{\max}$$

$$w = \frac{pR^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)$$

Длинная цилиндрическая оболочка. Равномерно распределенная по кругу радиальная нагрузка



В точке $x=0$


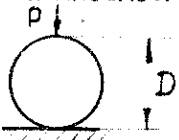
$$\sigma_x = \frac{3p_0}{2Kh^2} = \sigma_{\max}$$

$$w = -\frac{p_0 R^2 K}{2Eh}$$

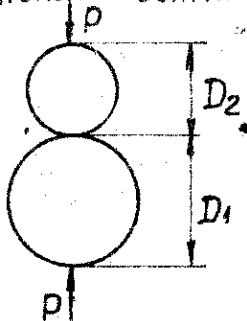
формулы верны при $l_0 > 3VRh$

Контактные напряжения [2]

P - полное давление в Н; p - нагрузка на единицу длины цилиндра или единицу длины пластинки в Н/м; q - среднее давление на единицу площади контакта в Па; q_0 - наибольшее давление на площадке контакта в Па; $\max \tau$ - наибольшее касательное напряжение в Па; $\max \sigma_1$ - наибольшее растягивающее напряжение в Па; C - радиус площадки контакта по кругу или половина ширины прямоугольной площадки контакта в м; w - величина сближения по линии давления точек обеих деталей, удаленных от зоны контакта в м; E - модуль продольной упругости в Па; 1 и 2 - индексы, соответствующие первой и второй деталям; D - диаметр в м.

<p>Цилиндр и плоскость</p> 	$q_0 = 0,59 \sqrt{\frac{pE}{D}}; C = 1,08 \sqrt{\frac{pD}{E}}$ (при $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$) $\max \tau = 250 \sqrt{\frac{p}{D}}$ (при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па и $\mu = 0,25$)
<p>Сфера и плоскость</p> 	Если $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ $C = 0,881 \sqrt[3]{\frac{pD}{E}}; q_0 = 0,616 \sqrt[3]{\frac{pE^2}{D^2}}$ $\max \sigma_1 = 0,133 q_0; \max \tau = \frac{1}{3} q_0$ $w = 1,55 \sqrt[3]{\frac{p^2}{E^2 D}}$

Цилиндры с параллельными осями



Если $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$

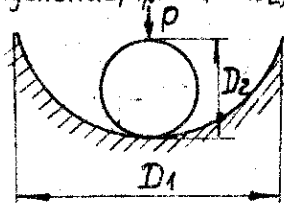
$$C = 1,08 \sqrt{\frac{P D_1 D_2}{E (D_1 + D_2)}}$$

$$q_0 = 0,59 \sqrt{\frac{P E}{D_1 D_2} \frac{D_1 + D_2}{D_1 D_2}}$$

Сближение центров с учетом контактных и общих деформаций цилиндров

$$W = \frac{2(1 - \mu^2)}{E} \frac{P}{\pi} \left(\frac{2}{3} + \ln \frac{4 D_1 D_2}{C^2} \right)$$

Сфера и деталь, имеющая сферическое углубление (при $D_1 \gg D_2$)



Если $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$

$$C = 0,881 \sqrt[3]{\frac{P}{E} \frac{D_1 D_2}{D_1 - D_2}}$$

$$q_0 = 0,616 \sqrt[3]{\frac{P E^2}{(D_1 - D_2)^2} \frac{D_1 D_2}{D_1 D_2}}$$

$$\max \tau = \frac{1}{3} q_0; \max \sigma_1 = 0,133 q_0$$

$$W = 1,55 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2} \frac{D_1 - D_2}{D_1 D_2}}$$

Литература

1. М. И. Кострыкин, Л. М. Величко, "Основы сопротивления материалов," Москва, "Машиностроение", 1977.
2. "Справочник машиностроителя" под редакцией С. В. Серенсена, т. 3, Москва, 1963.
3. С. В. Серенсен и др., "Валы и оси", Москва, 1959.
4. М. Н. Рудицын и др., "Справочное пособие по сопротивлению материалов," Минск, 1970.
5. А. А. Королев, "Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков," "Металлургия," Москва, 1969.

Валы и оси

Прочность при переменных напряжениях

1. Нагрузка изменяется по симметричному циклу ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$)

Запасы прочности на изгиб и кручение

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{C_{\sigma} \cdot \sigma_{\max}}, n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{C_{\tau} \cdot \tau_{\max}}, n_{\text{сум}} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$$

где σ_{-1} - предел усталости на изгиб

τ_{-1} - предел усталости на кручение

$$C_{\sigma} = \frac{K_{\sigma}}{\epsilon_{\sigma}}, C_{\tau} = \frac{K_{\tau}}{\epsilon_{\tau}}$$

K_{σ}, K_{τ} - коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении (см. рис. 3÷13)

$\epsilon_{\sigma}, \epsilon_{\tau}$ - коэффициенты, учитывающие влияние абсолютных размеров вала - масштабный фактор - рис. 12

2. Нагрузка изменяется от нуля до максимума - пульсирующий цикл (ось или кручение вала с $0 \leq M_{\text{кр}} \leq M_{\max}$)

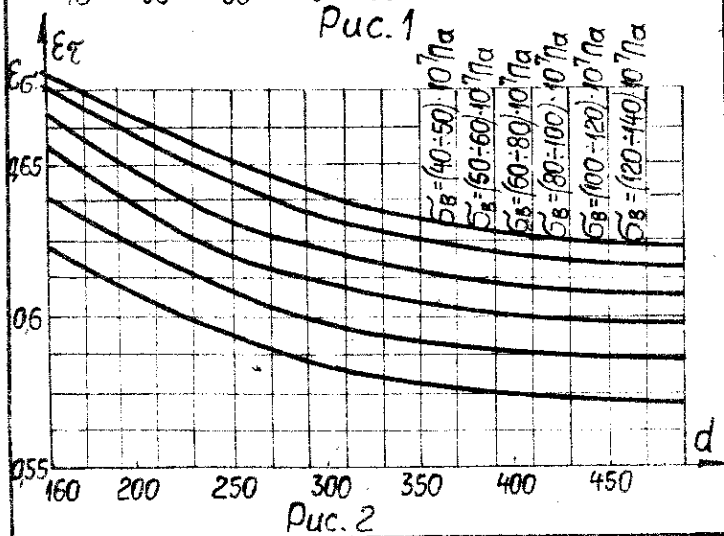
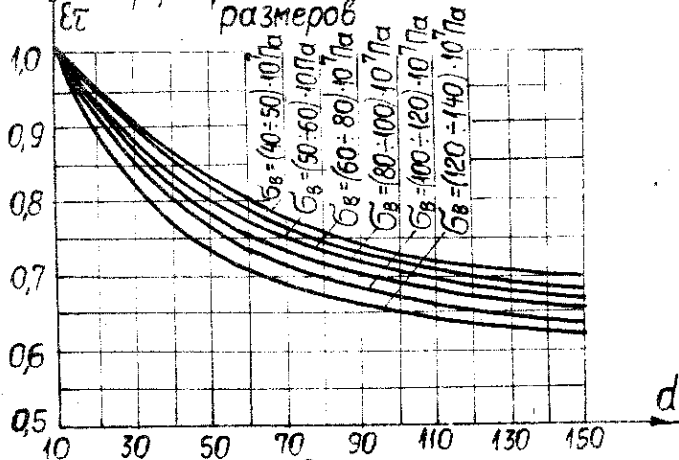
Запасы прочности на изгиб и кручение

$n_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1}}{(C_{\sigma} + \psi_{\sigma}) \sigma_{\max}}$	Предел прочности $\sigma_B, \text{Па}$	ψ_{σ}	ψ_{τ}
$n_{\tau} = \frac{2\tau_{-1}}{(C_{\tau} + \psi_{\tau}) \tau_{\max}}$	$(32 \div 48) \cdot 10^7$	0	0
$n_{\text{сум}} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$	$(48 \div 75) \cdot 10^7$	0,05	0
	$(75 \div 105) \cdot 10^7$	0,1	0,05
	$(105 \div 125) \cdot 10^7$	0,15	0,1
	$(125 \div 145) \cdot 10^7$	0,2	0,1

Допускаемый запас прочности

$$[n] = 1,5 \div 1,8$$

Ев) Коэффициенты влияния абсолютных размеров



Эффективные коэффициенты концентрации для валов со шпонками

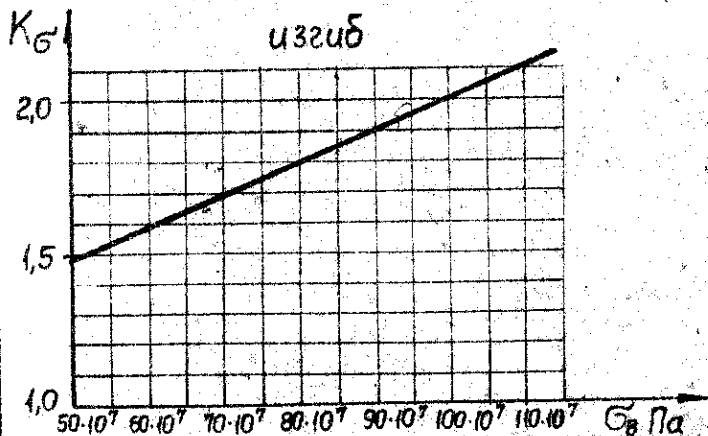


Рис. 3

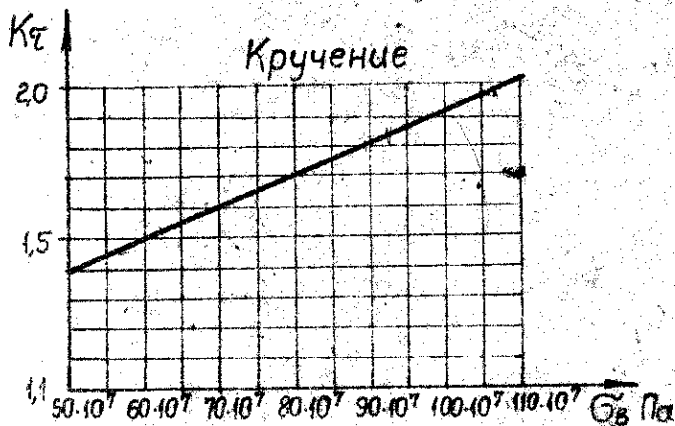
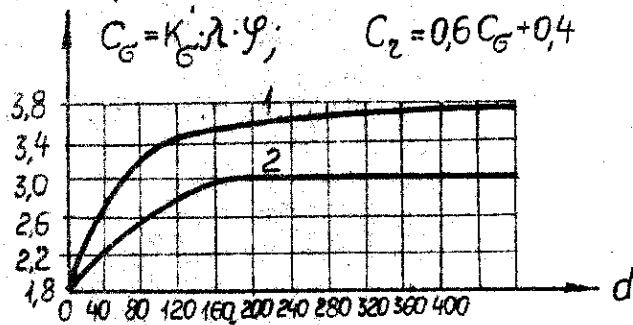


Рис. 4

Эффективный коэффициент концентрации при изгибе валов с напрессовкой



Коэффициент концентрации при $\sigma_B = 50 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $p = 3 \cdot 10^7 \text{ Па}$

1 - деталь передает усилие;
2 - усилие не передается

Рис. 11

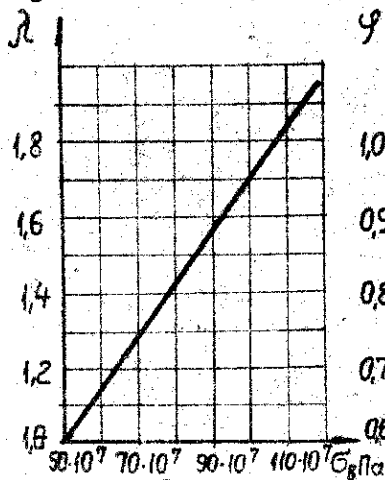


Рис. 12

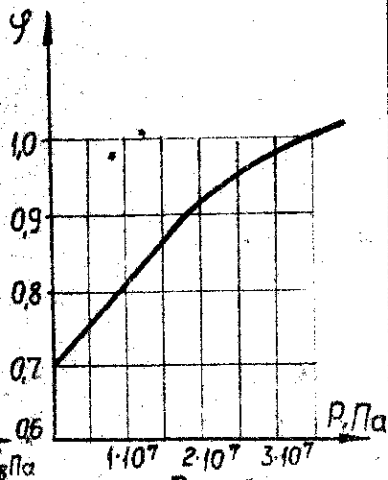


Рис. 13

Масштабный фактор для предела текучести

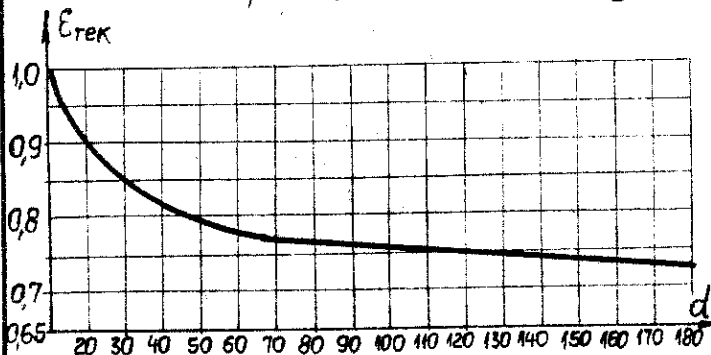


Рис. 14

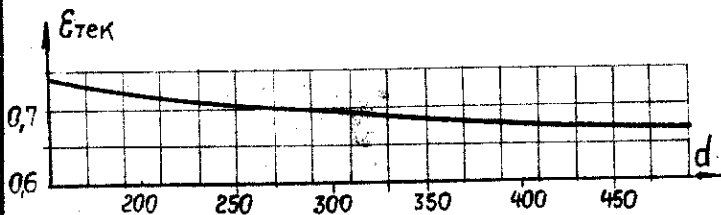
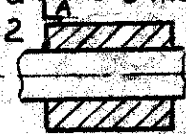
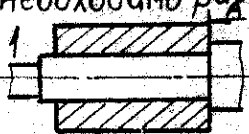


Рис. 15

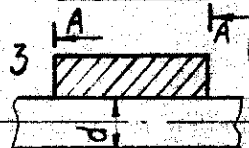
При расчетах соединений с натягом необходимо различать 5 типов соединений



$$C_\sigma = K_\sigma \cdot A \cdot \varphi \text{ (рис. 11-33)}$$

$$C_\tau = 0,6 C_\sigma + 0,4$$

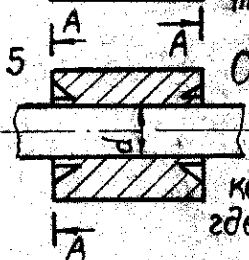
Масштабный фактор не учитывается



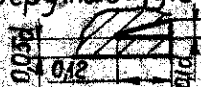
Ступица закруглена радиусом $r \geq 0,06d$. Коэффициент концентрации $C_\sigma = 0,85 C_{\sigma 1}$, где $C_{\sigma 1}$ - коэффициент концентрации напряжений по 1 схеме (см. рис. 11-13)



Подступичная часть вала увеличена до $1,06d$. Коэффициент концентрации от посадки равен 1. Учитывается концентрация от галтели.



Ступица имеет разгружающую выточку. Коэффициент концентрации $C_\sigma = 0,75 C_{\sigma 1}$, где $C_{\sigma 1}$ - коэффициент по 1 схеме (рис. 11-13)



Запасы прочности при статическом нагружении

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{\text{ти}} \cdot \varepsilon_{\text{тек}}}{\sigma_{\text{мах}}}, n_\tau = \frac{\tau_{\text{г}} \cdot \varepsilon_{\text{тек}}}{\tau_{\text{мах}}}, n_{\text{сум}} = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \geq 7$$

$\varepsilon_{\text{тек}}$ - масштабный фактор по пределу текучести (рис. 14-15)

Угол закручивания 1м вала

$$\varphi = \frac{57,3 M_k \cdot l}{G \cdot J_p} = \frac{M_k}{14 \cdot 10^9 d^4} \left[\frac{\text{град}}{\text{м}} \right]$$

где M_k - крутящий момент в Н·м

l - длины вала в м

$G = 8 \cdot 10^{10}$ Па - модуль упругости при сдвиге

$J_p = 0,1 d^4$ м⁴ - полярный момент инерции

d - диаметр вала в м

Допускаемые углы закручивания
и допустимое напряжение

$d, \text{мм}$	<40	$40-60$	$60-80$	$80-100$	$100-140$	$140-200$	>200
$[\varphi] \frac{\text{град}}{\text{м}}$	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,88	0,25
$[\tau] \text{Па}$	$35 \cdot 10^5$	$31,5 \cdot 10^5$	$28 \cdot 10^5$	$24,5 \cdot 10^5$	$21 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^5$	$1,78 \cdot 10^5$

Расчет по эквивалентной нагрузке

Если нагрузка ступенчатого характера, причем повторяемость каждой ступеньки $< 10^7$ циклов, то расчет ведется по эквивалентной нагрузке

$$P_{\text{экв}} = P_{\text{max}} \sqrt[9]{\sum_i \left(\frac{P_i}{P_{\text{max}}} \right)^9 \frac{t_i}{t_4}}$$

$$M_{\text{экв}} = M_{\text{max}} \sqrt[9]{\sum_i \left(\frac{M_i}{M_{\text{max}}} \right)^9 \frac{t_i}{t_4}}$$



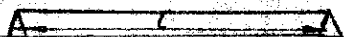
Изгибные колебания валов с жесткими опорами

Число собственных колебаний

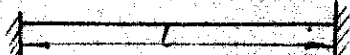
$$N = 9,55 \cdot \frac{\alpha^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \approx 1,22 \cdot 10^6 \alpha^2 \cdot l \left[\frac{\text{кол}}{\text{мин}} \right]; d, l \text{ в см}$$

Схема вала

α $1,22 \cdot 10^6 \alpha^2$



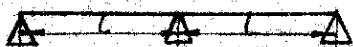
3,14 $1,2 \cdot 10^7$



4,73 $2,73 \cdot 10^7$



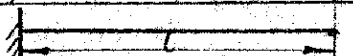
3,927 $1,88 \cdot 10^7$



3,14 $1,2 \cdot 10^7$

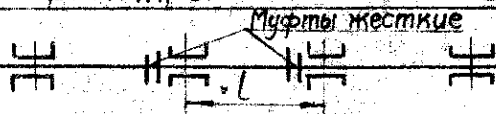


3,39 $1,4 \cdot 10^7$

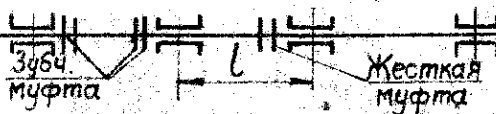


1,875 $4,3 \cdot 10^6$

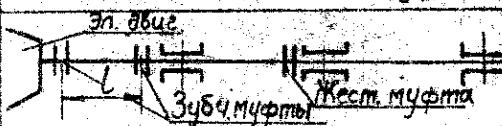
Параметры α по данным ВНИИПТМАШ



3,28 $1,31 \cdot 10^7$



3,18 $1,23 \cdot 10^7$



3,14 $1,2 \cdot 10^7$

Механические характеристики

Условные обозначения:

О - отжиг; Н - нормализация

У - улучшение Ц - цементация

ЗВ - закалка с охлаждением в воде;

ЗМ - закалка с охлаждением в масле

В таблицах 4 и 5 данные приведены для 10 мм образцы (при расчетах необходимо умножить табличные значения на масштабный фактор ϵ_b, ϵ_t)

Схема перевода в другую систему единиц:

$$\sigma_B = 44 \cdot 10^7 \text{ Па} = 44 \text{ кгс/мм}^2 = 4400 \text{ кгс/см}^2$$

Поковки

Таблица 1

Марка стали	ГОСТ	Термообработка	Твердость НВ	Размеры детали, мм	Предел прочности σ_B , Па	Предел текучести σ_T , Па
20	1050-74	Н	не более 156	до 100	$44 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$
				101-300	$44 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$
25	1050-74	Н	не более 170	до 100	$48 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$
				101-300	$48 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$
				301-500	$44 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$
35	1050-74	Н	не более 187	до 100	$54 \cdot 10^7$	$28 \cdot 10^7$
				101-300	$54 \cdot 10^7$	$28 \cdot 10^7$
				301-500	$48 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$

Поковки				Таблица 2		
Марка стали	ГОСТ	Термообра- ботка	Твердость HB	Размеры де- талл, мм	Предел проч- ности σ_B , Па	Предел теку- чести σ_T , Па
45	1050-74	H	не бо- лее 217	до 100	$58 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$
				101-300	$58 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$
				301-500	$54 \cdot 10^7$	$28 \cdot 10^7$
		3B	230-260	до 100	$63 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$
50	1050-74	H	не бо- лее 229	до 100	$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$
				101-300	$58 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$
				301-500	$58 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$
20X	4543-71	3B	174-217	до 100	$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$
				101-300	$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$
38XA	4543-71	3M	240-280	до 100	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
				101-200	$67 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
				230-260	$65 \cdot 10^7$	$45 \cdot 10^7$
40X	4543-71	3M	240-290	до 100	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
				101-200	$67 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
				230-260	$65 \cdot 10^7$	$45 \cdot 10^7$
45X	4543-71	3M	260-300	до 100	$75 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$
				101-300	$67 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
				301-500	$65 \cdot 10^7$	$45 \cdot 10^7$
				501-800	$65 \cdot 10^7$	$45 \cdot 10^7$
				210-250	$65 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$
		H	210-250	101-300	$65 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$

Поковки

Таблица 3

Марка стали	ГОСТ	Термообработка	Твердость HB	Размеры детали, мм	Предел прочности σ_B , Па	Предел текучести σ_T , Па
55X	3541-74	3M	260-310	до 100	$85 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$
			240-290	101-300	$80 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
			230-270	301-500	$75 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
		H	210-240	501-800	$65 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$
			260-310	до 100	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$
			240-290	101-300	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
35X	4543-71	3M	260-310	до 100	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$
			240-290	101-300	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
			260-310	до 100	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$
40XH	4543-71	3M	260-300	101-300	$75 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$
			240-290	301-500	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
			230-270	501-800	$67 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$
			300-340	до 100	$95 \cdot 10^7$	$80 \cdot 10^7$
			280-320	101-300	$90 \cdot 10^7$	$75 \cdot 10^7$
			270-320	301-500	$85 \cdot 10^7$	$70 \cdot 10^7$
38XH	4543-71	3M	260-300	501-800	$75 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$
			поверх 54-60 HRC	до 100	$75 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$
			сер 229-230			
12XH3A	4543-71	Ц+3M	260-310	до 100	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$
			260-300	101-300	$75 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$
			240-290	301-500	$70 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$
35XM	4543-71	3M	230-270	501-800	$67 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$

Углеродистые стали Табл. 4

Марка стали	ГОСТ	Термообра- ботка	Предел проч- ности σ_B , Па	Предел те- кучести σ_T , Па	Предел усталости		
					На растя- жение σ_r , Па	На изгиб $\sigma_{изг}$, Па	На круче- ние σ_k , Па
Ст 2	380-71		33·10 ⁷	22·10 ⁷	12,5·10 ⁷	15,5·10 ⁷	9,5·10 ⁷
Ст 3	380-71		37·10 ⁷	24·10 ⁷	13,5·10 ⁷	17·10 ⁷	10·10 ⁷
Ст 4	380-71		41·10 ⁷	26·10 ⁷	15·10 ⁷	19·10 ⁷	11,5·10 ⁷
Ст 5	380-71		50·10 ⁷	29·10 ⁷	18·10 ⁷	22,5·10 ⁷	13,5·10 ⁷
Ст 6	380-71		60·10 ⁷	32·10 ⁷	22·10 ⁷	27·10 ⁷	16·10 ⁷
08	1050-74	H	33·10 ⁷	20·10 ⁷	12·10 ⁷	15·10 ⁷	9·10 ⁷
10	1050-74	H	34·10 ⁷	21·10 ⁷	12,5·10 ⁷	15,5·10 ⁷	9,5·10 ⁷
15	1050-74	H	38·10 ⁷	23·10 ⁷	13,5·10 ⁷	17·10 ⁷	10·10 ⁷
20	1050-74	H	42·10 ⁷	25·10 ⁷	15·10 ⁷	19·10 ⁷	11,5·10 ⁷
25	1050-74	H	46·10 ⁷	28·10 ⁷	17·10 ⁷	21·10 ⁷	12,5·10 ⁷
30	1050-74	H	50·10 ⁷	30·10 ⁷	18·10 ⁷	22,5·10 ⁷	13,5·10 ⁷
		Y	60·10 ⁷	35·10 ⁷	21,5·10 ⁷	27·10 ⁷	16·10 ⁷
35	1050-74	H	54·10 ⁷	32·10 ⁷	19·10 ⁷	24·10 ⁷	14,5·10 ⁷
		Y	65·10 ⁷	38·10 ⁷	23·10 ⁷	29·10 ⁷	17,5·10 ⁷
40	1050-74	H	58·10 ⁷	34·10 ⁷	21·10 ⁷	26·10 ⁷	15,5·10 ⁷
		Y	70·10 ⁷	40·10 ⁷	25·10 ⁷	31,5·10 ⁷	19·10 ⁷
45	1050-74	H	61·10 ⁷	36·10 ⁷	22·10 ⁷	27,5·10 ⁷	16,5·10 ⁷
		Y	75·10 ⁷	45·10 ⁷	27·10 ⁷	34·10 ⁷	20,5·10 ⁷
50	1050-74	H	64·10 ⁷	38·10 ⁷	23·10 ⁷	29·10 ⁷	17,5·10 ⁷
		Y	80·10 ⁷	50·10 ⁷	32,5·10 ⁷	40,5·10 ⁷	24,5·10 ⁷

Легированные стали

Табл.5

Марка стали	ГОСТ	Термообра- ботка	Предел проч- ности σ_B , Па	Предел теку- щего σ_T , Па	Предел усталости		
					На растя- жение σ_{-1} , Па	На изгиб σ_{-1} , Па	На кручение τ_{-1} , Па
20X	4543-71	H	$60 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^7$	$21 \cdot 10^7$	$26 \cdot 10^7$	$15 \cdot 10^7$
		У	$70 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$	$28 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$20 \cdot 10^7$
40X	4543-71	H	$63 \cdot 10^7$	$33 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$	$31 \cdot 10^7$	$18 \cdot 10^7$
		У	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$	$23 \cdot 10^7$
45X	4543-71	H	$65 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$26 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$	$18,5 \cdot 10^7$
		У	$95 \cdot 10^7$	$75 \cdot 10^7$	$38 \cdot 10^7$	$47 \cdot 10^7$	$27 \cdot 10^7$
50X	4543-71	H	$65 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$26 \cdot 10^7$	$32,5 \cdot 10^7$	$18,5 \cdot 10^7$
30XM	4543-71	M	$95 \cdot 10^7$	$75 \cdot 10^7$	$38 \cdot 10^7$	$47,5 \cdot 10^7$	$23 \cdot 10^7$
35XM	4543-71	M, 270	$100 \cdot 10^7$	$85 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$	$50 \cdot 10^7$	$29 \cdot 10^7$
40XH	4543-71	H	$78 \cdot 10^7$	$46 \cdot 10^7$	$31 \cdot 10^7$	$39 \cdot 10^7$	$22,5 \cdot 10^7$
		M43	$120 \cdot 10^7$	$100 \cdot 10^7$	$48 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$	$34,5 \cdot 10^7$
12XH3A	4543-71	У	$95 \cdot 10^7$	$70 \cdot 10^7$	$38 \cdot 10^7$	$47 \cdot 10^7$	$27 \cdot 10^7$
20XH3A	4513-71	У	$95 \cdot 10^7$	$75 \cdot 10^7$	$38 \cdot 10^7$	$47 \cdot 10^7$	$27 \cdot 10^7$
20XГСА	4543-71	M	$80 \cdot 10^7$	$65 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$	$23 \cdot 10^7$
30XГС	4543-71	O	$60 \cdot 10^7$	$36 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$
30XГСА		У	$110 \cdot 10^7$	$85 \cdot 10^7$	$44 \cdot 10^7$	$55 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$
35XГСА	4543-71	У	$120 \cdot 10^7$	$100 \cdot 10^7$	$48 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$
38XГС	4543-71	M	$165 \cdot 10^7$	$130 \cdot 10^7$	$66 \cdot 10^7$	$82 \cdot 10^7$	$48 \cdot 10^7$
60C2H2A	14958-60	M	$175 \cdot 10^7$	$160 \cdot 10^7$	$70 \cdot 10^7$	$87,5 \cdot 10^7$	$50,5 \cdot 10^7$
ШХ15	801-60	O	$60 \cdot 10^7$	$38 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^7$	$18 \cdot 10^7$

Стальное литье

ГОСТ 977-75 и ГОСТ 2676-77.

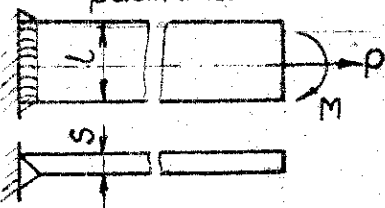
Таблица 6

Марка стали	Термообработка	Твердость, HB	Предел прочности σ_B , Па	Предел текучести σ_T , Па	Предел усталости		
					Нарастание σ_{-1} , Па	На изгиб σ_{-1} , Па	На кручение σ_{-1} , Па
20Л	H	≤ 156	$42 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$	$12 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$
25Л	H		$45 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$12,5 \cdot 10^7$	$18 \cdot 10^7$	$11 \cdot 10^7$
30Л	H	≤ 170	$48 \cdot 10^7$	$26 \cdot 10^7$	$13,5 \cdot 10^7$	$19 \cdot 10^7$	$11,5 \cdot 10^7$
35Л	H	≤ 187	$50 \cdot 10^7$	$28 \cdot 10^7$	$14 \cdot 10^7$	$20 \cdot 10^7$	$12 \cdot 10^7$
45Л	H	≤ 217	$55 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$	$15,5 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$	$13 \cdot 10^7$
55Л	H		$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
20ХМЛ	H		$45 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$	$12,5 \cdot 10^7$	$18 \cdot 10^7$	$11 \cdot 10^7$
30ХМЛ	У		$82 \cdot 10^7$	$69 \cdot 10^7$	$23 \cdot 10^7$	$33 \cdot 10^7$	$20 \cdot 10^7$
35ХМЛ	H		$60 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
35ХГЛ	H		$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
	38		$80 \cdot 10^7$	$60 \cdot 10^7$	$22,5 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^7$	$19 \cdot 10^7$
20ГЛ	H		$55 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^7$	$15,5 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$	$13 \cdot 10^7$
	H		$55 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^7$	$15,5 \cdot 10^7$	$22 \cdot 10^7$	$13 \cdot 10^7$
35ГЛ	H		$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
	38		$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
30ГЛ	H		$60 \cdot 10^7$	$35 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	$24 \cdot 10^7$	$14,5 \cdot 10^7$
	3М		$65 \cdot 10^7$	$40 \cdot 10^7$	$18 \cdot 10^7$	$25 \cdot 10^7$	$15 \cdot 10^7$

Сварные соединения [1]

Стыковой шов

$[\sigma_p']$ - допускаемые напряжения шва при растяжении



$$\sigma' = \frac{P}{Sl} + \frac{6M}{Sl^2} \leq [\sigma_p']$$

1) $P \neq 0$

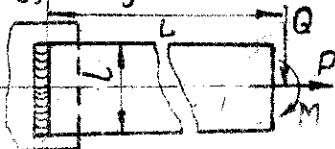
$$\sigma' = \frac{6M}{Sl^2} \leq [\sigma_p']$$

2) $M = 0$

$$\sigma_p' = \frac{P}{Sl} \leq [\sigma_p']$$

Угловой шов

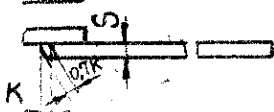
$[\tau_c']$ - допускаемые напряжения среза



1) $Q = 0$

$$\tau_c' = \frac{P}{0,7KL} + \frac{6M}{0,7KL^2} \leq [\tau_c']$$

2) $P = 0; M = 0$



$$\tau_c' = \sqrt{\left(\frac{P}{0,7KL}\right)^2 + \left(\frac{6PL}{0,7KL^2}\right)^2} \leq [\tau_c']$$

Допускаемые напряжения

Метод сварки	Допускаемые напряжения		
	$[\sigma_p]$	$[\sigma_c']$	$[\tau_c']$
Автоматическая ручная электродами Э42А и Э50А	$[\sigma_p]$	$[\sigma_p]$	$0,65[\sigma_p]$
Ручная электродами Э42	$0,9[\sigma_p]$	$[\sigma_p]$	$0,6[\sigma_p]$
Контактная точечная	—	—	$0,5[\sigma_p]$

$[\sigma_p]$ - допускаемое напряжение основного металла соединяемых элементов при растяжении

$$[\sigma_p] = \frac{R \cdot m}{K} \quad \text{где } R = (0,85 \div 0,9) \sigma_T$$

0,9 - для малоуглеродистой стали

0,85 - для низколегированной

$K = 1,0 - 1,5$ - коэффициент перегрузки

$m = 0,8 - 0,9$ - коэффициент условия работы

При переменных нагрузках допускаемые напряжения на сварные швы понижаются умножением на коэффициент γ

$$\gamma = \frac{1}{(aK\sigma \pm b) - (aK\sigma \mp b)r}; \quad r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$a = 0,9; b = 0,3$ - для углеродистой стали

$a = 0,6; b = 0,2$ - в краностроении

Эффективные коэффициенты концентрации K_σ		
Элементы	Малоуглеродистая сталь	Низколегированная сталь
Основной металл		
У перехода к стыковому шву с механической обработкой	1,2	1,4
То же, без механической обработки	1,5	1,9
У перехода к лобовому шву с мех. обработкой и с отношением катетов 1:1,5	2	2,5
То же, без мех. обработки	2,7	3,3
У ребер жесткости и диафрагм, приваренных лобовыми швами	1,5	1,9

У косынок, приваренных встык и втавр	2,7	3,3
У косынок, приваренных внахлестку	2,7	3,3
<u>Сварные швы</u>		
Стыковые швы пол- ным проваром	1,2	1,4
Угловые лобовые швы	2	2,5
Фланговые швы	3,5	4,5

Верхние знаки в формуле следует брать, если наибольшее по абсолютной величине напряжение-растягивающее, а нижние-сжимающее.

Сварные котлы

Потребная толщина стенки $\delta = \frac{pD}{2\varphi[\sigma]}$

где $\varphi = \frac{\sigma_{\sigma}'}{\sigma_{\sigma}}$, σ_{σ}' - предел прочности шва
 σ_{σ} - предел прочности основного металла.

Литература

1. Д.Н. Решетов, "Детали машин", Москва, "Машиностроение", 1974.

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

C, C_0 - динамическая и статическая грузоподъемность подшипника, Н;

F_r, F_a - радиальная и осевая нагрузка на подшипник, Н;

n - частота вращения подшипника ^{об}мин;

i - число рядов тел качения в подшипнике;

α - угол контакта тел качения.

Эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник:

$$P = (V \cdot X \cdot F_r + Y \cdot F_a) \cdot K_\delta \cdot K_T, \text{ Н,}$$

где K_T, K_δ - температурный коэффициент и коэф. безопасности,

$K_T = (1,05 \div 1,4)$ при $t^\circ = (125^\circ\text{C} \div 250^\circ\text{C})$,

Характер нагрузки	Сложная	Легкие толчки	Умеренные толчки и вибрация	Значительные толчки	Сильные удары
K_δ	1	1,1 ÷ 1,2	1,3 ÷ 1,8	1,9 ÷ 2,4	2,5 ÷ 3

значения коэффициентов приведения нагрузки (V, X, Y) - в табл. 2-5

Таблица 2

Численные значения (V):

Тип подшипника		Упорные шар. и ролики: рад. шарик. сфер. рад-уп. шар.магн.	Все др. типы
По отношению к вектору нагрузки внутр. кольцо	вращ.	1	1
	неповр.	1	1,2

Таблица 3

Числовые значения (X, Y) для радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников

α°	$\frac{F_a}{C_0}$	X		Y		e
		однорядн. $\frac{F_a}{V \cdot F_r} > e$	Двухрядные $\frac{F_a}{V \cdot F_r} \leq e$	однорядн. $\frac{F_a}{V \cdot F_r} > e$	Двухрядные $\frac{F_a}{V \cdot F_r} \leq e$	
0	0,014			2,30	2,30	0,19
	0,056			1,71	1,71	0,25
	0,110	0,56	1	1,45	1,45	0,30
	0,280			1,15	1,15	0,38
10	0,014			1,68	2,18	0,29
	0,057			1,52	1,76	0,36
	0,110	0,46	1	1,34	1,55	0,40
	0,290			1,10	1,27	0,49
15	0,015			1,47	1,65	0,38
	0,058			1,30	1,46	0,43
	0,120	0,44	1	1,19	1,34	0,47
	0,290			1,02	1,14	0,55
-		0,40	1	0,4 · ctg α	0,42 · ctg α	1,5
					0,65 · ctg α	1,6

Для однорядных подшипн. при $\frac{F_a}{V \cdot F_r} \leq e$: X=1, Y=0

Таблица 4
Значения (х, у) для радиальных шарик. и конич. роликоподш. (при $\alpha=0$; $F_a=0$; $x=1$)

Тип подшип.	X				Y				e
	однорядн.		двухрядн.		однорядн.		двухрядн.		
	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$	$\frac{F_a}{F_r} > e$	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$	$\frac{F_a}{F_r} > e$	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$	$\frac{F_a}{F_r} > e$	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$	$\frac{F_a}{F_r} > e$	
Сферич. и конич. $\alpha \neq 0$	1	0,4	1	0,67	0	$0,4x \operatorname{ctg} \alpha$	$0,45x \operatorname{ctg} \alpha$	$0,67x \operatorname{ctg} \alpha$	$1,5x \operatorname{ctg} \alpha$

Таблица 5
Значения коэффициентов (х, у) для упорных и уп.-рад. шарико- и роликоподш. (при $\alpha=90^\circ$; $F_r=0,9$)

Тип подш.	α°	Х			У			е
		Одинар	Двойной		Одинар	Двойной		
			$\frac{F_a}{F_r} > e$	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$	
Шарико-	45	0,66	1,18	0,66	1	0,59	1	1,25
вые	60	0,92	1,90	0,92	1	0,54	1	2,17
Рол. сфер. и конич.	< 90	$\operatorname{tg} \alpha$	$1,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	1	0,67	1	$1,5 \times \operatorname{tg} \alpha$

Таблица 6
Значения (Х₀, У₀) для радиальных и радиально-упорных подшипников.

Тип подшипника	Однорядные		Двухрядные	
	Х ₀	У ₀	Х ₀	У ₀
Шариковые радиальн.	0,6	0,5	—	—
Шариковые сферич.	—	—	1	$0,44 \operatorname{ctg} \alpha$
Роликовые сфер. и кон.	0,5	$0,22 \operatorname{ctg} \alpha$	1	$0,47 \operatorname{ctg} \alpha$
Шариковые рад.-упорные	$\alpha=20^\circ$	0,5	0,42	1
	$\alpha=30^\circ$	0,5	0,33	1

Долговечность подшипника

$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{P} \right)^m$ [4]; $m = \begin{cases} 3 - \text{для шарикоподшип.} \\ 3,33 - \text{для роликоподш.} \end{cases}$
 при $n = (1-10)^{0,8}$ /мин принимают $n = 10^{0,8}$ /мин.

При $n < 1^{0,8}$ /мин подшипник проверяют на статическую грузоподъемность:

а) для радиальных или рад-упорн. подш.

$$f_s \cdot P_0 \leq C_0, \quad f_s = (0,5-2,5);$$

$$P_0 = (X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a) \quad \text{или} \quad P_0 = F_r,$$

берется большая величина;

б) для упорных или упорно-радиальных подшипников

$$P_0 = (X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a), \quad [H].$$

Значения (X_0, Y_0) - в табл. 6.

Литература:

1) РТМ 24.010.18-73. Подшипники качения для металлургического оборудования. Выбор и расчет долговечности.

2) РТМ 24.010.14-73. Подшипники качения для металлургического оборудования. Габаритные размеры и нормы работоспособности.

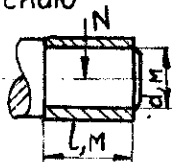
3) Р.Д. Бейзельман и др. Подшипники качения. Справочник. Изд. Машиностроение, 1975.

ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ.

Для подшипников скольжения, работающих в режиме полусухого и полужидкостного трения:

а) расчет по удельному давлению

$$p = \frac{N}{d \cdot l} \leq [p], [Па],$$



где N - радиальная нагрузка на подшипник, [Н];

$[p]$ - допускаемое удельное давление;

б) расчет по величине $(p \cdot v)$

$$(p \cdot v) = \frac{N \cdot n}{191 \cdot l} \leq [p \cdot v], [Па \cdot \frac{м}{с}],$$

где v - окружная скорость скольжения, м/с;

n - частота вращения, об/мин.

Ориентировочные значения

$[p]$, $[p \cdot v]$:

Механизмы	$[p]$, Па	$[p \cdot v]$, Па· $\frac{м}{с}$
Редукторы зубч. и червячн.	$(20-60) \cdot 10^5$	$(40-80) \cdot 10^5$
Открытые тихоходн. передачи	$(10-40) \cdot 10^5$	$(30-60) \cdot 10^5$
Транспортеры, шнеки, рольганги	$(20-100) \cdot 10^5$	$(40-100) \cdot 10^5$
Валки прокатных станков	$(200-400) \cdot 10^5$	$(400-2000) \cdot 10^5$
Приводы вращающихся печей, сушильных барабанов и т. п.	$(40-150) \cdot 10^5$	$(60-150) \cdot 10^5$

Резьбовые соединения.

1. Основной расчетный случай:
болт нагружен продольной силой.
Диаметр болта по заданному
внешнему усилию

$$F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \geq \frac{P}{[\sigma]},$$

где P - растягивающее усилие от действия рабочих нагрузок, приходящееся на данный болт, в Н

$[\sigma]$ - допускаемое напряжение на растяжение в Па,

d_1 - внутренний диаметр резьбы в м,

F_1 - площадь поперечного сечения болта по резьбе в м²;

Момент на ключе при затяжке

$$M_{кл} \approx 0,15 Q \cdot d$$

где d - наружный диаметр резьбы, м.

Q - усилие на болт, Н.

Обычно $M_{кл} = (0,04 \div 0,06) \sigma_T d^3$

где σ_T - предел текучести материала

2. Дополнительные расчетные случаи.

Болт нагружен поперечной силой. Если болт плотно пригнан по отверстию, то диаметр стержня болта d_s определяют из расчета на срез:

$$\frac{\pi d_s^2}{4} \leq \frac{P}{[\tau]}$$

где P - поперечная сила, Н

$[\tau] \approx (0,2 - 0,3) \sigma_T$ - допускаемое напряжение на срез, Па.

Если болт поставлен с зазором, то поперечная нагрузка должна восприниматься силами трения; Болт рассчитывают на силу затяжки:

$$Q_0 = \frac{P}{f} = \frac{\pi d_1^2}{4} [\sigma]$$

где f - коэффициент трения,

3. Специальные резьбы.

Расчетные зависимости для витков.

Гайка

Винт

$$\tau = \frac{P}{\pi \beta h d_0} ;$$

$$\tau = \frac{P}{\pi \beta h d_1} ;$$

Смятие витков

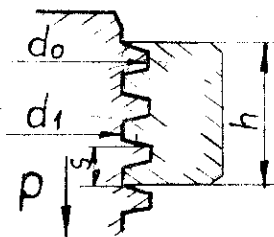
$$\sigma = \frac{P}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) z} ;$$

где S - шаг резьбы,

z - число витков гайки, $\left(\frac{h}{S}\right)$;

P - нагрузка,

Коэффициент β зависит от профиля резьбы: для треугольных резьб $\beta \approx 1$, для квадратной $\beta = 0,5$, для трапециодальных $\beta = 0,63-0,68$, для упорной $\beta = 0,75$.



Допускаемые статические нагрузки $P_{доп}$ в Н на болты с основной метрической резьбой для ст 3.

d_o - номинальный диаметр резьбы в мм.

d_o	$P_{доп}$	d_o	$P_{доп}$	d_o	$P_{доп}$	d_o	$P_{доп}$	d_o	$P_{доп}$
6	750	12	3600	22	19000	30	45000	48	127000
8	1400	16	7500	24	23000	36	70000	56	177000
10	2400	20	14000	27	33000	42	95000	64	230000

d_0	$P_{доп.}$
72	280000
76	320000

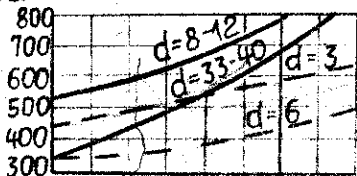
где d_0 - номинальный диаметр резьбы в мм,
 для болтов из ст 45 $P=1,6P_{доп}$
 из ст 40Х $P=2,2P_{доп}$. Для болтов с начальной затяжкой следует принимать нагрузку $P=(0,75-0,8)P_{доп}$. Предельные допускаемые статические напряжения для болтов $[\sigma] = 0,8\sigma_T$.

Пружины сжатия круглого сечения
 Дано: P_H, P_K - наименьшая и наибольшая нагрузки; h - рабочий ход.

Порядок расчета $[\tau]$ МПа

1. Определить коэф. асимметрии

$$\tau = P_M : P_K$$



2. Задаться по графику $[\tau]$, где - для стали 60С2, $\sigma_T = 4000$ МПа
 - для стали НШ, $\sigma_T = 500 \div 700$ МПа.

3. Определить нагрузку пружины при $\tau = 100$ МПа
 $P_{100} = 100 P_K : [\tau]$

4. Подобрать по таблице по P_{100}, P, λ
 d, c

5. Определить прогиб под нагрузкой P_K
 $\lambda = 0,1 P_K \cdot \lambda_{100}, \quad \lambda = 0,01 P_K \lambda_{1000}$

6. Определить прогиб пружины под нагрузкой P_K $f_K = h P_K : (P_K - P_H)$

7. Определить число рабочих витков

$$i = f_k \cdot \lambda$$

8. Проверить высоту пружины под нагрузкой P_k

$$H_k = (\alpha + \delta) i + d$$

где $\delta \approx 0,1 d$ - зазор между витками при P_k .

9. Проверить высоту пружины в свободном состоянии

$$H_0 = H_k + f_k$$

10. Наибольшее напряжение при P_k

$$\tau_{\max} = 100 P_k : P$$

11. Предельное напряжение при соприкосновении витков

$$\tau_{\text{пред.}} = \tau_{\max} H_k : (H_k - \delta_i) < \sigma_T$$

Индекс пружины $C = D : d$

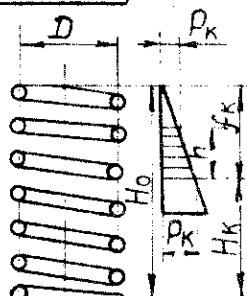
P_{100} - нагрузка в Н соответствующая напряжению в пружине $\tau = 100 \text{ МПа}$

λ - деформация одного витка пружины в мм, при нагрузке $\lambda_{100} 100 \text{ Н}$, $\lambda_{1000} 1000 \text{ Н}$

K - коэффициент кривизны.

$$(1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}, 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^5 \text{ Па})$$

Σ	C=4		C=5		C=6		C=7		C=8	
	K=1,4		K≈1,31		K≈1,25		K≈1,21		K=1,18	
$10^3 \lambda$	P_{100}	λ_{100}	P_{100}	λ_{100}	P_{100}	λ_{100}	P_{100}	λ_{100}	P_{100}	λ_{100}
3	64,5	$2 \cdot 10^{-4}$	54,8	$4 \cdot 10^{-4}$	47,5	$7 \cdot 10^{-4}$	42,1	$11 \cdot 10^{-4}$	37,8	$17 \cdot 10^{-4}$
4	115	$1,6 \cdot 10^{-4}$	97,5	$3 \cdot 10^{-4}$	84,5	$5,4 \cdot 10^{-4}$	75	$8,5 \cdot 10^{-4}$	67,2	$12,8 \cdot 10^{-4}$
5	179	$1,3 \cdot 10^{-4}$	152	$2,5 \cdot 10^{-4}$	132	$4 \cdot 10^{-4}$	117	$6,8 \cdot 10^{-4}$	105	$10 \cdot 10^{-4}$
6	258	$1 \cdot 10^{-4}$	219	$2 \cdot 10^{-4}$	190	$3,6 \cdot 10^{-4}$	168	$5,7 \cdot 10^{-4}$	151	$8,5 \cdot 10^{-4}$
		λ_{1000}		λ_{1000}		λ_{1000}		λ_{1000}		λ_{1000}
8	459	$8 \cdot 10^{-4}$	390	$1,56 \cdot 10^{-4}$	338	$27 \cdot 10^{-4}$	300	$43 \cdot 10^{-4}$	269	$64 \cdot 10^{-4}$
10	717	$6,4 \cdot 10^{-4}$	609	$12,5 \cdot 10^{-4}$	528	$21,6 \cdot 10^{-4}$	467	$34 \cdot 10^{-4}$	420	$51 \cdot 10^{-4}$
12	1030	$5 \cdot 10^{-4}$	877	$10,4 \cdot 10^{-4}$	760	$18 \cdot 10^{-4}$	675	$28,6 \cdot 10^{-4}$	605	$42,7 \cdot 10^{-4}$
14	1400	$4,6 \cdot 10^{-4}$	1190	$8,9 \cdot 10^{-4}$	1030	$15,4 \cdot 10^{-4}$	905	$24,5 \cdot 10^{-4}$	82,5	$36,6 \cdot 10^{-4}$
16	1830	$4 \cdot 10^{-4}$	1560	$7,8 \cdot 10^{-4}$	1350	$13,5 \cdot 10^{-4}$	1200	$21,4 \cdot 10^{-4}$	1070	$32 \cdot 10^{-4}$
18	2320	$3,6 \cdot 10^{-4}$	1970	$6,9 \cdot 10^{-4}$	1710	$12 \cdot 10^{-4}$	1510	$19 \cdot 10^{-4}$		
20	2780	$3 \cdot 10^{-4}$	2440	$6 \cdot 10^{-4}$	2110	$10,8 \cdot 10^{-4}$	1870	$17 \cdot 10^{-4}$		
22	3470	$2,9 \cdot 10^{-4}$	2940	$5,7 \cdot 10^{-4}$	2550	$9,8 \cdot 10^{-4}$				
25	4810	$2,6 \cdot 10^{-4}$	3810	$5 \cdot 10^{-4}$	3300	$8,6 \cdot 10^{-4}$				
28	5630	$2 \cdot 10^{-4}$	4770	$4,5 \cdot 10^{-4}$	4140	$7,8 \cdot 10^{-4}$				
30	6450	$2 \cdot 10^{-4}$	5480	$4 \cdot 10^{-4}$	4750	$7,2 \cdot 10^{-4}$				
32	7360	$2 \cdot 10^{-4}$	623	$3,9 \cdot 10^{-4}$	5400	$6,8 \cdot 10^{-4}$				
36	9300	$1,8 \cdot 10^{-4}$	7890	$3,5 \cdot 10^{-4}$	6850	$6 \cdot 10^{-4}$				
40	1150	$1,6 \cdot 10^{-4}$	9740	$3 \cdot 10^{-4}$	8450	$5,4 \cdot 10^{-4}$				



Основные формулы расчета на прочность.

$$\frac{8K P_{\text{кон}} D}{\pi d^3} \leq [\tau], \text{ в среднем}$$

$$[\tau] \approx 5000 \cdot 10^5 \div 7000 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Осевое перемещение к концу нагружения

$$\lambda_{\text{кон}} = \frac{8 P_{\text{кон}} \cdot D^3 i}{\sigma d^4};$$

i - число рабочих витков.

Условие устойчивости $H_0 \leq 2.5 D$.

Расчет винтовых цилиндрических одношильных пружин кручения.

Расчет винтовой цилиндрической пружины из проволоки круглого сечения производят на изгиб по моменту M закручивающему пружину $\sigma_u = \frac{KM}{0.1d^3} \leq [\sigma_u];$

$$[\sigma_u] = 1.25 [\tau_k], \quad K > 1 \text{ зависит от}$$

формы сечения и кривизны витка.

Для пружин с витками круглого сечения

$$K = \frac{4c-1}{4c-4};$$

с витками прямоугольного сечения

$$K = \frac{3c-1}{3c-3} ;$$

шаг витков пружины $t = d + \Delta$,

где $\Delta = 1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4}$ м - зазор между витками.

Число рабочих витков пружины при заданном угле закручивания

$$\varphi_{\text{рад}} \quad n = \frac{\varphi EJ}{\pi D M} ;$$

где $J \approx 0.5d^4$ - осевой момент инерции сечения проволоки

E - модуль продольной упругости материала пружины.

Высота пружины

$$L_0 = nt + 2h_{\text{пр}}$$

где $h_{\text{пр}}$ - высота одного прицепа пружины.

Зубчатые передачи

Основные обозначения [6]

$d_1; d_2$ — делительные диаметры шестерни и колеса, м

a_w — межосевое расстояние, м

z — число зубьев

b_w — рабочая ширина зуба, м

$u = \frac{z_2}{z_1}$ — передаточное число

m — модуль, м ; $\alpha = 20^\circ$ — угол зацепления

β — угол наклона зуба, град.

φ — угол делительного конуса, град.

L — образующая начального конуса, м

z_x — число заходов червяка

λ — угол подъема витка червяка

q — коэффициент диаметра червяка

$h_a = m$ — высота головки зуба, м

h_f — высота ножки зуба, м

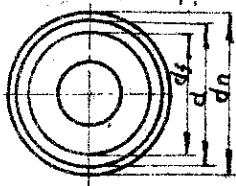
c — радиальный зазор, м

T — крутящий момент на колесе, Н·м

$X = 0$ — коэффициент смещения

Геометрические формулы основных передач

Цилиндрическая прямозубая

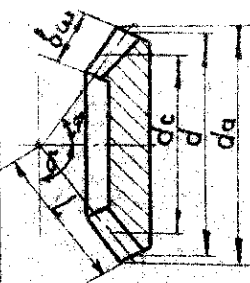


$$\begin{aligned}d &= m \cdot z; & d_a &= m(z+2); \\d_f &= m(z-2,5); & h_a &= m; \\h_f &= m + c = 1,25 m; \\a_w &= 0,5 m (z_1 + z_2)\end{aligned}$$

Цилиндрическая косозубая

$m_n = m_t \cos \beta$, где m_t — модуль торцевой, m_n — нормальный модуль;
 $d = m_t z = \frac{m_n z}{\cos \beta}$; $d_a = d + 2 m_n$;
 $h_a = m_n$; $h_f = m_t + c = 1,25 m_t$;
 $a_w = \frac{z_1 + z_2}{2 \cdot \cos \beta} \cdot m_n = 0,5 m_t (z_1 + z_2)$.

Коническая прямозубая ($\delta = 90^\circ$)

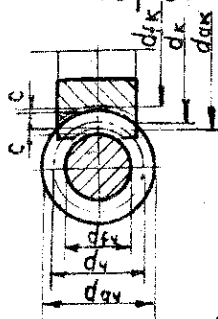


$$\begin{aligned}d &= m z; & d_a &= d - b \cdot \sin \varphi \\d_a &= d + 2 m \cdot \cos \varphi; & L &= \frac{d}{2 \sin \varphi} \\h_a &= m; & h_f &= 1,2 m\end{aligned}$$

Коническая косозубая

$$\begin{aligned}m_n &= m \cdot \cos \beta; & d &= m_t z = \frac{m_n z}{\cos \beta}; \\L &= \frac{d}{2 \sin \varphi}; & d_a &= d + 2 m \cdot \cos \varphi.\end{aligned}$$

Червячная передача



$$d_q = q \text{ m}; \quad d_K = Z_K \text{ m};$$

$$d_{ay} = d_y + 2m; \quad d_{ak} = d_k + 2m;$$

$$d_{f4} = d_4 - 2,4 \text{ m}; \quad d_{fK} = d_K - 2,4 \text{ m};$$

$$h_a = m; \quad h_f = m + c; \quad c = 0,2;$$

$$a_{\omega} = 0,5m (z_k + q); \quad \operatorname{tg} \lambda = \frac{z_4}{q};$$

$$U = \frac{Z_K}{Z_4}; q = 7,5 \div 16; U = 8 \div 90.$$

Силы расчет [1], [2], [3]

Окружная сила:

для цилиндрической $\rho = \frac{2M_1}{d_1}$;

для конической $\rho = \frac{2M_0}{d_{c1}}$;

Радиальная сила: $(\overset{\text{дет}}{\text{tg}} \alpha_n = \text{tg} \alpha \cdot \cos \beta)$

для прямозубой цилиндрической $P_p = P \cdot \operatorname{tg} \alpha$;

для косозубой цилиндрической $\rho_p = \frac{p \cdot \lg \alpha}{\cos \beta}$;

для конической $P_{pw} = \frac{P}{\cos \beta} (\operatorname{tg} \alpha_n \cdot \cos \psi \pm \sin \beta \cdot \sin \psi)$

Осевая сила:

для цилиндрической прямозубой $P_0 = 0$,

для цилиндрической косозубой $P_0 = P \cdot \operatorname{tg} \beta$;

для конической передачи

$$P_{out} = \frac{P}{\cos \beta} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_n \cdot \sin \varphi + \sin \beta \cdot \cos \varphi).$$

Верхние знаки - при совпадении направления наклона зуба с направлением вращения ведущего колеса со стороны большого диаметра.

Силы в червячной передаче:

окружное на колесе, равное осевому усилию на червяке $P_k = \frac{2M_k}{d_k} = P_{oc}$;

радиальное усилие на колесе и червяке $P_r = P_k \cdot \operatorname{tg} \alpha$; ρ - угол трения;

осевое на колесе, равное окружному на червяке $P_{ок} = P_k \cdot \operatorname{tg}(\lambda + \rho) = P_{\psi} = \frac{2M_{\psi}}{d_{\psi}}$

Прочностной расчет

Цилиндрическая передача [6]

Расчет на контактную вынос-

ливаемость $\sigma_H = Z \cdot \sqrt{\frac{T(U+1)^3}{u^2 d_{\omega}^3 \psi_{ba}}} \cdot \sqrt{K_{H\beta} \cdot K_{H\gamma}}$; МПа

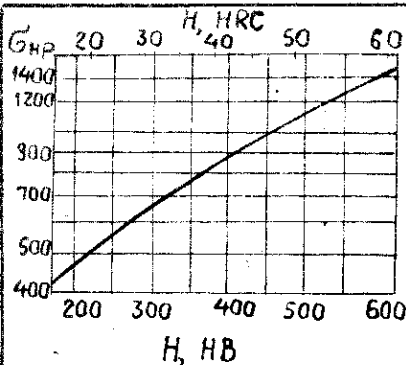
$Z = 0,31$ - для прямозубых;

$Z = 0,27$ - для косозубых;

$K_{H\beta} = 1 \div 1,8$; $K_{H\gamma} = 1 \div 1,4$; $\psi_{ba} = \frac{b_{\omega}}{d_{\omega}}$;

$\sigma_{H \cdot \max} = \sigma_H \cdot \sqrt{\frac{T_{\max}}{T}}$.

Допускаемые контактные напряжения:



$\sigma_{0.2 \max} = 2,8 \sigma_T$ -
при нормализации,
объемной закалке.
 $\sigma_{0.2 \max} = 40 \text{ HRC}$ -
при цементации
и ТВЧ.

Расчет на выносливость при изгибе

$$\sigma_{FI} = \frac{\sigma_F \cdot K_{F2} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{FV}}{10^6 \cdot m} \cdot Y_F ; \text{ МПа}$$

$$\sigma_F = \frac{T \cdot (u+1)}{a_w^2 \cdot \psi_{Ba} \cdot u} , \text{ Н/М}$$

$$K_{F\beta} = 1 \div 1,8; K_{FV} = 1 \div 1,5; Y_F = 3 \div 4,4$$

Допускаемое напряжение изгиба

$$\sigma_{FR} = \sigma_{Flimb} \cdot K_{FC} \cdot Y_S \cdot X_{Fx};$$

$$K_{FC} = 0,75 \div 1; Y_S = 0,7 \div 1,1; K_{Fx} = 0,7 \div 1$$

Стали	Способ обработки	σ_{Flimb} МПа	σ_{Flimb} МПа
40, 45, 40Х, 40ХН	Нормализация HB 180-350	1,8 HB	4,8 HB
40ХН, 40ХН 2Мn, 40Х, 40ХФА	Объемная закалка HRC 45-55	520 480	2800 2450
40ХН, 40ХН 2Мn, 40Х, 35ХМ	ТВЧ HRC 48-58	700 600	2500 2200
20ХН3А, 20Х2Н4А 18ГТ, 30ХГТ	Цементация HRC 55-63	320 750	2650 2700

Коэффициент запаса $\sigma_F = \frac{\sigma_{FR}}{\sigma_F}$

$\sigma_F \geq 1,75; 2,2; 2,8-3,5$ — для менее ответственной, более ответственной и при ТВЧ;

$$\sigma_{Fmax} = \sigma_F \cdot \frac{T_{max}}{T}; \quad \sigma_{FRmax} = \sigma_{FLim} \cdot \psi_s \cdot K_{Fx}$$

Коническая передача [5]

Расчет зубьев на изгиб

$$\sigma_F = \frac{P \cdot K_o \cdot K_s \cdot K_m}{b \cdot m \cdot J_F \cdot 10^5} \leq \sigma_{FR}, \text{ МПа}$$

где P — окружное усилие, Н

$K_o = 1 \div 2,25$ — коэффициент перегрузки

$$K_s = \sqrt[4]{\frac{1000 \cdot m}{25,4}} \text{ при } m \geq 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$K_s = 0,5 \text{ при } m < 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$K_m = 1 \div 1,4$ — коэффициент расположения опор;

$J_F = 0,18 \div 0,42$ — коэффициент количества зубьев.

Допускаемое напряжение при изгибе $\sigma_{FR} = \frac{\sigma_{Fa}}{K_R}$,

где σ_{Fa} — допускаемое напряжение растяжения.

$K_R = 1 \div 2$ — коэффициент запаса

Основное допустимое напряжение растяжения (при реверсивной нагрузке $\sigma_{Fa} = 0,7 \sigma_{Fa}$)

Материал	Термообработка	Твердость по В.		σ_{Fa} МПа
		HB	HRC	
Сталь	Цементация	575-625	55 min	211
Сталь	Закалка ТВЧ	450-500	50 min	95
Сталь	Закалка и отпуск	300 min	—	134
Сталь	Закалка и отпуск	180 min	—	95
Сталь	Нормализация	140 min	—	77
Чугун	без термообработки	200 min	—	49
Чугун	без термообработки	175 min	—	32
Чугун	без термообработки	—	—	19

Расчет на контактные напряжения

$$\sigma_H = \frac{C_P}{10^6} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot K_o \cdot K_m}{K_v \cdot b \cdot d \cdot J_H}} \leq \sigma_{H\text{пр}}, \text{ МПа}$$

Материал		Фактор упрочности $C_P, H^{1/2}/\text{М}$
шестерня	Колесо	
Сталь	Сталь	234000
Сталь	Чугун	205000
Чугун	Сталь	205000
Чугун	Чугун	186500

K_o ; K_m см. изгиб,

$K_v = 0,2 \div 1$ — коэффициент качества,

$J_H = 0,04 \div 0,1$ — от числа зубьев.

Допускаемое контактное напряжение $\sigma_{\text{нр}} = \frac{\sigma_{\text{на}}}{K_R}$,
 где $\sigma_{\text{на}}$ - основное допустимое контактное напряжение,
 $K_R = 1 \div 1,25$ - коэффициент запаса.

Материал	Термообработка	Твердость по В.		$\sigma_{\text{на}}$ МПа
		HB	HRC	
Сталь	Цементация	625 min	60 min	1758
Сталь	Цементация	575 min	55 min	1406
Сталь	Закалка ТВЧ	500 min	50 min	1336
Сталь	Закалка и отпуск	440 min	—	1336
Сталь	Закалка и отпуск	300 min	—	949
Сталь	Закалка и отпуск	180 min	—	668
Чугун	Без термообработки	200 min	—	457
Чугун	Без термообработки	175 min	—	352
Чугун	Без термообработки	—	—	210

Червячная передача [2], [4]

Расчет на контактную выносливость

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{0,474}{d_k} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot T_k}{d_d}} \leq \sigma_{\text{нр}}, \text{ МПа};$$

$K = K_{\beta} \cdot K_{\gamma}$ - коэффициент нагрузки

$$K_{\beta} = 1 + \left(\frac{Z_k}{\theta} \right)^3 \cdot (1 - X);$$

Z ₄	Коэффициент деформации Θ при φ						
	7,1	8	9	10	11	12,5	14
1	57	72	89	108	127	157	190
2	45	57	71	86	102	125	152
3	40	51	61	76	89	110	134
4	37	47	58	70	82	101	123

$$\chi = \frac{T_{\text{ср}}}{T_{\text{max}}} = \sum \frac{T_i}{T_{\text{max}}} \cdot \frac{n_{i\text{об}}}{N};$$

$$N = \sum t_i n_i; \quad n_{i\text{об}} = t_i n_i;$$

$$K_v = 1 \text{ при } V_k \leq 3 \text{ м/с}; \quad K_v = 1 + 1,3 \text{ при } V_k \geq 3 \text{ м/с}$$

Допускаемые контактные напряжения при колесе из бронз средней прочности (оловянистые)

$$\sigma_{\text{нр}} = \sigma_{\text{нр}}^0 \cdot \sqrt[3]{\frac{10^7}{N_E}}; \quad \text{где } \sigma_{\text{нр}}^0 = (0,75 \div 0,9) \sigma_B;$$

$$N_E = 60 \sum \left(\frac{T_i}{T_{\text{max}}} \right)^4 \cdot n_i t_i \leq 25 \cdot 10^7$$

Для твердых бронз и чугунов:

$\sigma_{\text{нр}} = 300 - 25 V_{\text{ск}}$ — колесо из БрАЖ9-4 и червяк из закаленной стали,

$\sigma_{\text{нр}} = 210 - 35 V_{\text{ск}}$ — колесо и червяк чугунные.

$V_{\text{ск}}$ — скорость скольжения, м/с

Расчет зубьев червячного колеса на прочность по напряжениям изгиба

$$\sigma_F = \frac{Y_H \cdot P_k \cdot \cos \lambda}{10^6 \cdot 1,3 \cdot m^2 \cdot q} \leq \sigma_{FP}$$

Z_Y	Y_H	Z_Y	Y_H	Z_Y	Y_H	Z_Y	Y_H
20	1,98	30	1,76	40	1,55	80	1,34
24	1,88	32	1,71	45	1,48	100	1,30
26	1,85	35	1,64	50	1,45	150	1,27
28	1,80	37	1,61	60	1,40	300	1,24

$Z_v = \frac{Z_k}{\cos^3 \lambda}$ — эквивалентное число зубьев

Допускаемые напряжения изгиба

Материал колеса	Вид передачи			
	нереверсивная		реверсивная	
	σ_{FP}^0	σ_{FP}	σ_{FP}^0	σ_{FP}
Бронза	$0,256 \sqrt[3]{\frac{10^6}{N_E}}$	$0,086 \sqrt[3]{\frac{10^6}{N_E}}$	0,1668	$0,071 \sqrt[3]{\frac{10^6}{N_E}}$
Чугун	—	0,1268	—	0,07568

$$N_E = 60 \sum \left(\frac{T_i}{T_{\max}} \right)^9 \cdot n_i \cdot t_i ;$$

при $N_E \leq 10^6$ принимаем $N_E = 10^6$
 при $N_E > 25 \cdot 10^7$ ————— $N_E = 25 \cdot 10^7$

При червяках с $HRC \geq 45$ допускаемые напряжения изгиба увеличиваются на 25%.

Предельные напряжения на максимальную статическую нагрузку:

$[σ_{FR}]_{пр} = 0,8σ_T$ — для бронзы,

$[σ_{FR}]_{пр} = 0,6σ_B$ — для чугуна.

Материал колеса	Механические свойства	
	$σ_B$, МПа	$σ_T$, МПа
Бр. ОФ10-1 при отливке в песок	200	120
Бр. ОФ10-1 в кокиль	260	150
Бр. ОФ10-1 при центробежном литье	290	170

Глобоидная передача [2]

Допускаемый момент на колесе

$$M_k = 10^5 a_w^3 \cdot K_k \cdot K_m \cdot K_p \quad (\text{Н} \cdot \text{м});$$

$K_k = \frac{12200 - 40 \cdot u}{u + 900}$; $K_m = 0,3$; 1- колесо из чугуна, из бронзы; $K_p = 0,75$ -при ударе, $K_p = 1,15; 1,35; 1,6$ — при $PB = 0,3; 0,2; 0,1$

Литература

1. П. Г. Гузенков. Детали машин. Высшая школа. Москва. 1975г.
2. Д. Н. Решетов. Детали машин. Машиностроение. Москва. 1974г.
3. В. А. Добровольский. Детали машин. Машгиз. Москва Киев. 1956г.
4. Л. Д. Часовников. Передатки зубчатые. Машиностроение. Москва. 1969г.
5. Глисон. Проектирование зубчатых конических и гипоидных передач. Машгиз. 1963г.
6. ОСТ 24.841.02-77. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления редукторов металлургического оборудования.

СМАЗКА

Динамическая (абсолютная) вязкость (μ) измеряется в пуазах (Пз)

$$[\text{Пз}] = 0,01 \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 0,102 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 0,102 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$$

Кинематическая вязкость определяется как отношение динамической вязкости к плотности

$$\nu = \mu / \rho \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$$

Величина кинематической вязкости, равная $10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ называется стоксом (Ст). На практике вязкость измеряют в сантипуазах (сПз) и сантистоксах (сСт). $\text{Пз} = 100 \text{ сПз}$
 $\text{Ст} = 100 \text{ сСт}$

При обозначении вязкости указывают температуру в индексе, например: ν_{50} , μ_{50} - значение вязкости при 50°C .

Ниже приводятся формулы для пересчета единиц измерения вязкости применяемые в США и др. странах.

Наименование единиц	Обоз- наче- ние	Формула перес- чета $\gamma, \text{м}^2/\text{с}$
Градусы Энглера	$^{\circ}\text{E}$	$0,0731^{\circ}\text{E} - \frac{0,0631}{^{\circ}\text{E}}$
Секунды Энглера	$"\text{E}; \text{SE}$	$0,001435"\text{E} - \frac{3,29}{"\text{E}}$
Секунда Сейболта Универсаль (США)	$"\text{S},$ SSU	$0,0022"\text{S} - \frac{1,8}{"\text{S}}$
Секунда Сейболта Фурол (США)	$"\text{SF},$ SSF	$0,022"\text{SF} - \frac{2,03}{"\text{SF}}$
Секунды Редвуда Торговые (Англия)	$"\text{R},$ SR	$0,0026"\text{R} - \frac{1,72}{"\text{R}}$
Секунды Редвуда Адмиралти (США)	$"\text{RA},$ SRA	$0,0239"\text{RA} - \frac{0,403}{"\text{RA}}$
Градусы Барбье (Франция)	$^{\circ}\text{B}$	$\frac{48,5}{^{\circ}\text{B}}$

Сжимаемость смазок характе-
ризуется модулем объемной
упругости

$$K = -V \frac{dp}{dV} \quad \left(V - \text{объем} \right. \\ \left. p - \text{давление} \right)$$

Для минеральных масел $K = (1,4 \dots 2) \text{ГПа}$.

Наименование, марка смазки	Вязкость $\gamma_{50}, \text{сСт}$	Температура, °C		Область применения
		вышки	застывания	
Индустриальное 12 (веретенное 2)	10...14	165	-30	Механизмы с высокой скоростью скольжения, гидравлич. системы, электродвигатели
Индустриальное 20 (веретенное 3)	17...23	170	-20	та же, что и индустриальное 12
Индустриальное 30 (машинное л)	27...33	180	-15	подшипники качения, зубчатые передачи, направляющие
Индустриальное 50 (машинное) СУ	42...58	200	-20	Механизмы работающие в помещениях с повышенной температурой нагрузки более $2,5 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}^2}$ при скорости до 1 м/с
П-28 (бraitсток)	26...30 при 100°C	285	-10	ПЖТ, редукторы, нажимные устройства
Авиационное МС-20	20 при 100°C	225	-18	ПЖТ, нажимные устройства
Турбинное 30	28...30	180	-10	ПЖТ, электрические машины

Тепловые расчеты.

Количество тепла, полученное телом массы m при увеличении (уменьшении) его температуры на Δt .

$$Q = cm \Delta t \text{ КДЖ (ккал)}$$

m - масса тела, кг

Δt - изменение температуры, $^{\circ}\text{C}$

c - удельная теплоемкость, $\frac{\text{КДЖ}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ($\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$)

Передача тепла теплопроводностью определяется законом Фурье

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{ds} \frac{\text{КДЖ}}{\text{с}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{с}} \right)$$

λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ($\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}$)

F - поверхность, теплоотдачи, м^2

$\frac{dT}{ds}$ - температурный перепад

Количество тепла, передаваемого теплопроводностью через плоскую стенку толщиной S_1 на поверхностях которой температуры t_1 и t_2 :

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{t_1 - t_2}{s} \frac{\text{кДж}}{4} \left(\frac{\text{ккал}}{4} \right)$$

Передача тепла конвекцией описывается законом Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_n - t_{\text{ср}}) \frac{\text{кДж}}{4} \left(\frac{\text{ккал}}{4} \right)$$

F — поверхность теплоотдачи, м^2

t_n — температура теплоотдающей поверхности, $\text{К} (^{\circ}\text{C})$

$t_{\text{ср}}$ — температура среды, $\text{К} (^{\circ}\text{C})$

α — коэффициент теплоотдачи $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 4^{\circ}\text{C}} \right)$

Передача тепла излучением описывается по закону Стефана-Больцмана:

$$Q = \epsilon \cdot C_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\text{кДж}}{4} \left(\frac{\text{ккал}}{4} \right)$$

C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела

$$C_0 = 5,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \left(4,9 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 4^{\circ}\text{К}^4} \right)$$

ϵ — степень черноты тела,

F — излучающая поверхность, м^2

T_1 — абсолютная температура излучающей поверхности, $\text{К} (^{\circ}\text{C})$

12
t₂ - абсолютная температура
облученной поверхности, К (°К)

количество тепла, переходящее от
одной среды к другой через одно-
слойную или многослойную стенку,
определяется по формуле

$$Q = K \cdot F \cdot (t_c' - t_c'') \frac{\text{кДж}}{4} \left(\frac{\text{ккал}}{4} \right)$$

K - коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$

t_c' - температура среды, отдающей
тепло, К (°С)

t_c'' - температура среды, восприни-
мающей тепла, К (°С)

F - поверхность нагрева, м²

коэффициент теплопередачи
через однослойную стенку.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s}{\lambda}} - \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи среды, отдающей тепло, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{40C}} \right)$

α_2 - коэффициент теплоотдачи среды, воспринимающей тепло, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{40C}} \right)$

S - толщина разделяющей стенки, м

λ - коэффициент теплопроводности, стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{мК}} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м40C}} \right)$

В случае многослойной стенки

$$K = - \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}$$

Температуры на поверхности и между отдельными слоями получаются следующим образом:

$$t_1 = t_0' - \frac{Q}{F \cdot \alpha_1}$$

$$t_2 = t_1 - \frac{Q \cdot S_1}{F \cdot \lambda_1};$$

$$t_n = t_{n-1} - \frac{Q \cdot S_{n-1}}{F \cdot \lambda_{n-1}}$$

$$t_{n+1} = t_c'' + \frac{Q}{F \cdot \alpha_2}$$

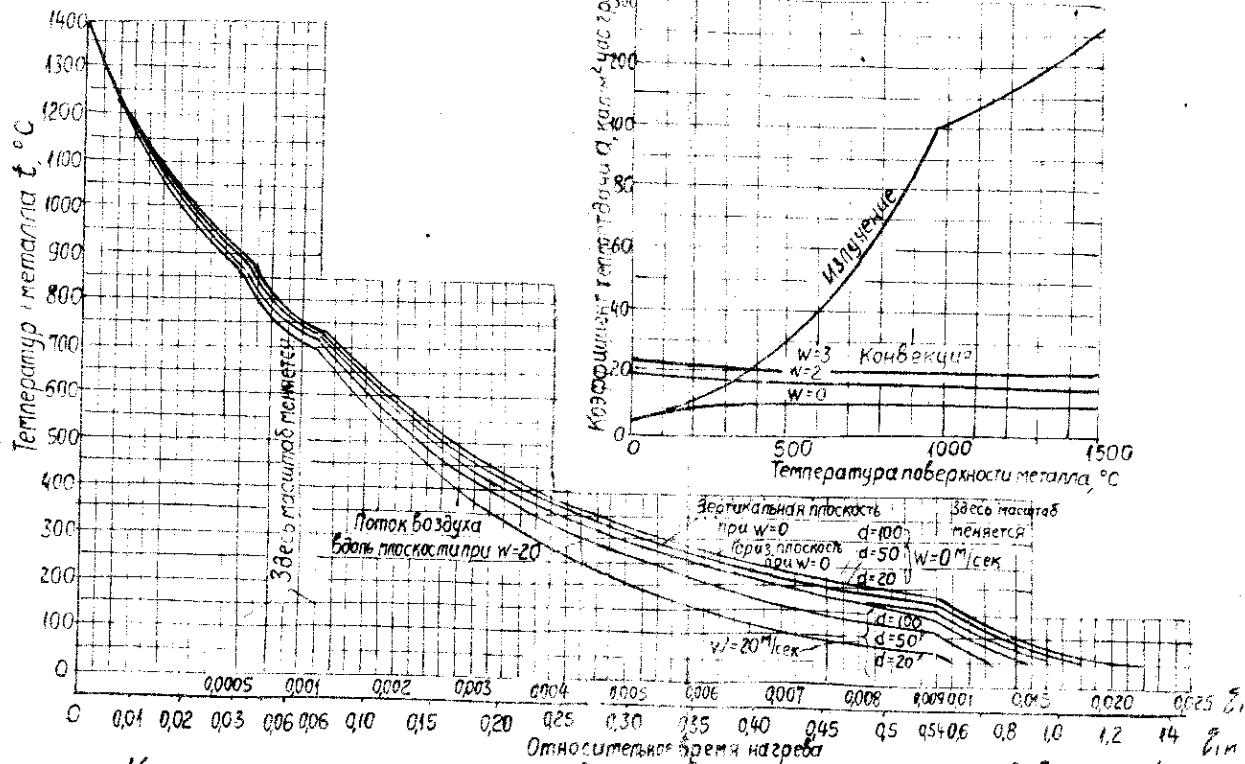
Время охлаждения металлического изделия от температуры t_1 до температуры t_2 определяется по формуле:

$$\tau = \frac{G}{F} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

G — масса изделия, кг

F — поверхность изделия, m^2

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — значения ε определяемые из графика для температуры t_1 и t_2 .



Кoeffициенты теплоотдачи и кривые остывания стальных прутков в спокойном или движущемся воздухе, температура которого равна $^\circ\text{C}$

плотность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость различных материалов.

Таблица 1

Наименование материала	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$c, \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Алюминий	2670	0	175,0	203	0,22	0,92
Бронза	8000	20	55,0	63,8	0,091	0,38
Латунь	8600	0	73,5	85,3	0,090	0,38
медь	8800	0	330,0	383	0,091	0,38
Никель	9000	20	50,0	58	0,11	0,46
Олово	7230	0	55,0	63,8	0,054	0,23
Сталь	7900	20	39,0	45,2	0,11	0,46
Чугун	7220	20	54,0	62,6	0,12	0,5
Асбест волокно	470	50	0,095	0,11	0,195	0,82
Бетон	2300	20	1,10	1,23	0,27	1,13

Степень черноты полного нормального
излучения для различных материалов
Таблица 2

Наименование материала	$t^{\circ}C$	ϵ
Алюминий полированный	225 ÷ 575	0,039 ÷ 0,057
Алюминий, окислен- ный при 600°	200 ÷ 600	0,11 ÷ 0,19
Железо полированное	425 ÷ 1020	0,144 ÷ 0,377
Железо, свежеработанное наждаком	20	0,242
Железо окисленное	100	0,736
Железо окисленное гладкое	125 ÷ 525	0,78 ÷ 0,82
Железо литое необ- работанное	925 ÷ 1115	0,87 ÷ 0,95
Стальное литье, полированное	770 ÷ 1040	0,52 ÷ 0,56
Сталь листовая шлифованная	940 ÷ 1100	0,55 ÷ 0,61
Сталь, окисленная при 600°	200 ÷ 600	0,80
Сталь листовая с плот- ным блестящим слоем окиси	25	0,82
Чугун обточенный	830 ÷ 990	0,60 ÷ 0,70
Бумага тонкая, наклеенная на металлическую пластину	19	0,924

Ориентировочные пределы значений коэффициентов теплоотдачи при нагревании и охлаждении некоторых сред

Таблица 3

Условия и среда	$\alpha \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	$\alpha \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$
Нагревание и охлаждение воздуха	$\alpha = 1 \div 50$	$\alpha = 1,16 \div 58$
перегретого пара	$\alpha = 20 \div 100$	$\alpha = 23 \div 116$
масел	$\alpha = 50 \div 1500$	$\alpha = 58 \div 1740$
воды	$\alpha = 200 \div 10000$	$\alpha = 232 \div 11600$
Кипение воды	$\alpha = 500 \div 45000$	$\alpha = 580 \div 52200$
Пленочная конденсация водяных паров	$\alpha = 4000 \div 15000$	$\alpha = 4640 \div 17400$
Капельная конденсация водяных паров	$\alpha = 40000 \div 120000$	$\alpha = 46400 \div 139200$
конденсация органических паров	$\alpha = 500 \div 2000$	$\alpha = 580 \div 2320$
Коэффициенты теплопередачи		
Условия и среда	$K \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	$K \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$
от газа к газу	$K = 25$	$K = 29$
газа к воде	$K = 50$	$K = 58$
керосина к воде	$K = 300$	$K = 348$
воды к воде	$K = 1000$	$K = 1160$
конденсирующихся паров к воде	$K = 2500$	$K = 2900$
к маслам	$K = 300$	$K = 348$
к кипящему маслу	$K = 500$	$K = 580$

Техническая механика

Обозначения, размерность в
системе СИ:

Сила	P	H
Масса	m	$кг$
Момент силы	M	$H \cdot м$
Объем	V	$см^3, м^3$
Плотность	ρ	$кг/м^3$
Удельный вес	γ	$H/м^3$
Длина	l	$м$
Время	t	$с$
Скорость	v	$м/с$
Угловая скорость	ω	$1/с$
Ускорение	a	$м/с^2$
Угловое ускорение	ε	$1/с^2$
Нормальное ускорение	a_n	$м/с^2$
Касательное ускорение	a_τ	$м/с^2$
Частота вращения	n	$об/мин$
Жесткость	C	$H/м$
Работа	A	$Дж$
Мощность	N	$кВт$
Кинетическая энергия	T	$Дж$
Потенциальная энергия	P	$Дж$
Момент инерции	J	$кг \cdot м^2$
Радиус инерции	i	$м$
Импульс силы	S	$H \cdot с$

Скорость $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$; $\omega = \frac{\pi n}{30}$;
 Ускорение $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$,
 где $a_n = \frac{V^2}{R} = \omega^2 \cdot R$, $a_\tau = \varepsilon \cdot R$

Движение	a_n	a_τ, ε	V, ω	S, φ
Прямолинейное $R = \infty$	0	a	$V_0 + at$	$V_0 \cdot t + a \cdot \frac{t^2}{2}$
Равномерное прямолинейное	0	0	const	$V_0 \cdot t$
Равноперемен- ное, прямоли- нейное	0	const	$V_0 + a_\tau \cdot t$	$X_0 + V_0 t + a_\tau \cdot \frac{t^2}{2}$
Равномерное криволинейное	$\frac{V^2}{r}$	0	const	$S_0 + Vt$
Равномерное вращательное				$\varphi_0 + \omega t$
Равноперемен- ное криволи- нейное	0	const	$V_0 + a_\tau \cdot t$	$S_0 + V_0 t + a_\tau \cdot \frac{t^2}{2}$
Равнопере- менное вра- щательное			$\omega_0 + \varepsilon t$	$\varphi_0 + \omega_0 t + \varepsilon \cdot \frac{t^2}{2}$

Мощность
 $N = \frac{A}{t} = P \cdot V$; вращающегося тела $N = M \cdot \omega$

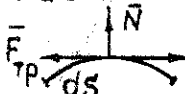
Работа

Работа силы тяжести $A = \pm G \cdot h$

Работа силы упругости $A = \frac{c}{2} (x_0^2 - x_1^2)$

Работа сил, приложенных к вращающемуся телу $A = M_z \cdot \varphi$

Работа сил трения



The diagram shows a curved surface with a normal force vector \vec{N} pointing upwards from a point on the curve. A friction force vector $\vec{F}_{тр}$ points to the left along the surface. A displacement vector \vec{s} points to the right along the surface. The angle between $\vec{F}_{тр}$ and \vec{s} is φ .

$$F_{тр} = \varphi \cdot N; A = - \int \varphi \cdot N \cdot ds$$

Кинетическая энергия

Поступательное движение $T = \sum \frac{m_k \cdot v_0^2}{2}$

Вращательное $T = \sum \frac{J_k \cdot \omega^2}{2}$

Плоскопараллельное

$$T = \frac{1}{2} M v_0^2 + \frac{1}{2} J_0 \cdot \omega^2$$

Для трубы

$$T = M v^2$$

Момент инерции тела

$$J = \sum m_k \cdot r_k^2 = M \cdot i^2$$

Маховый момент $G D^2 = 4g \cdot J; D = 2i$

Потенциальная энергия

Для силы тяжести $P = G \cdot h$

Для силы упругости $P = \frac{1}{2} c \cdot x^2$

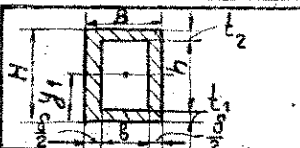
Координаты центра тяжести
твёрдого тела. G - сила тяжести

$$x_0 = \frac{\sum G_k \cdot x_k}{G}; \quad y_0 = \frac{\sum G_k \cdot y_k}{G}; \quad z_0 = \frac{\sum G_k \cdot z_k}{G};$$

$$G = \sum G_k; \quad G_k = \gamma \cdot V_k$$

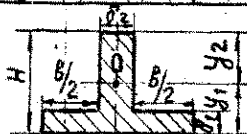
	<p>Дуга окружности $x_0 = R \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha}$</p>
	<p>Треугольник $h_1 = \frac{1}{3} h$</p>
	<p>Круговой сектор $x_0 = \frac{2}{3} R \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha}$</p>
	<p>Сегмент круга $x_0 = \frac{4}{3} R \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}$</p>
	<p>Полукруг, четверть круга $x_0 = \frac{4}{3\pi} \cdot R$</p>
	<p>Полуокружность $x_0 = \frac{2}{\pi} \cdot R$</p>
	<p>Четверть окружности $x_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot R$</p>

	<p>Сектор кольца</p> $X_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha}$
	<p>Половина кольца</p> $Y_1 = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{D^2 + Dd + d^2}{D + d}$
	<p>Сектор тонкого кольца</p> $Y_1 = \frac{d \cdot \delta}{2} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right) + \frac{\delta \cos \alpha}{2}$
	<p>Площадь, ограниченная дугой круга</p> $X_0 = Y_0 = 0,223 R$
	<p>Отрезок прямой</p> $Y_0 = \frac{b}{2} \sin \alpha; \quad X_0 = \frac{b}{2} \cos \alpha$
	<p>Прямоугольник повернутый</p> $Y_1 = \frac{h \cos \alpha + b \sin \alpha}{2}$
	<p>Угольник равнобокий</p> $Y_1 = \frac{H^2 + H \cdot h + h^2}{2(2H - h) \cdot \cos 45^\circ}$
	<p>Угольник неравнобокий</p> $X_0 = \frac{a^2 + b \cdot \delta}{2(a + b)}; \quad Y_0 = \frac{h^2 + d \cdot \delta}{2(h + d)}$
	<p>Z-профиль</p> $Y_0 = \frac{h}{2}$



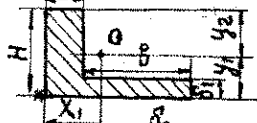
Полый прямоугольник

$$y_1 = \frac{\frac{BH^2}{2} - bh(t_1 + \frac{h}{2})}{BH - bh}$$



Прокатные профили:
тавр, уголок, швеллер

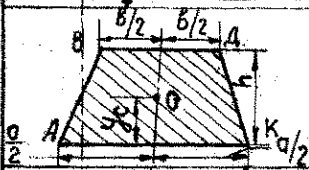
$$y_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta_2 H^2 + B \delta_1^2}{F},$$



$$y_2 = H - y_1;$$

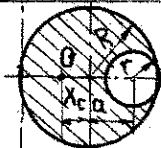


$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2 \delta_1 - H \delta_2^2}{F};$$



Площадь трапеции

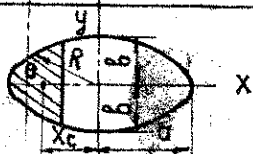
$$y_0 = \frac{h(a + 2B)}{3(a + B)}$$



Диск с отверстием

$$x_0 = - \frac{ar^2}{R^2 - r^2}$$

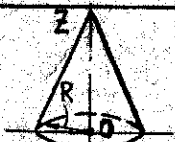


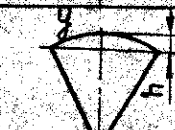
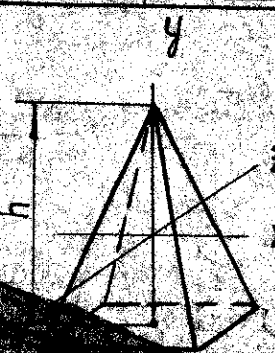
при $r = \frac{R}{2}$ $x_0 = -\frac{1}{6}R = -\frac{1}{3}r$

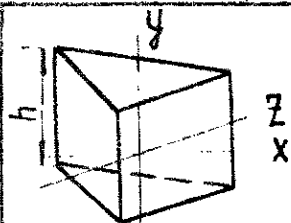


Эллиптический сегмент

$$x_0 = \frac{4}{3} \cdot \frac{R \sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}$$

Моменты инерции некоторых однородных тел

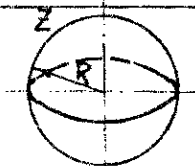
	<p>Сплошной прямой круглый конус</p> $J_z = 0.3MR^2$
	<p>Усеченный конус</p> $J_z = M \cdot \frac{3}{40} \left(\frac{D^5 - d^5}{D^3 - d^3} \right)$
	<p>Шароховой сектор</p> $J_y = \frac{M}{5} \cdot h (3R - h)$
	<p>Шаровой сегмент</p> $J_y = \frac{2M \cdot h}{(3R - h)} \cdot \left(R^2 - \frac{3}{4}Rh + \frac{3}{20}h^2 \right)$
	<p>Прямоугольная пирамида</p> $J_x = \frac{M}{20} \left(b^2 + \frac{3}{4}h^2 \right);$ $J_y = \frac{M}{20} \left(a^2 + b^2 \right);$ $J_z = \frac{M}{20} \left(a^2 + \frac{3}{4}h^2 \right).$



Правильная трех-
гранная призма

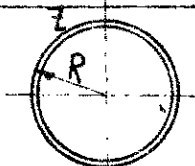
$$J_y = \frac{M}{12} a^2;$$

$$J_x = J_z = \frac{M}{24} (a^2 + 2h^2)$$



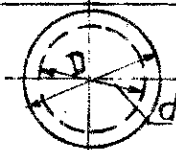
Шар радиуса R
относительно оси Z

$$J_z = 0,4 MR^2$$



Полый шар со стек-
ной малой толщины

$$J_z = \frac{2}{3} MR^2$$



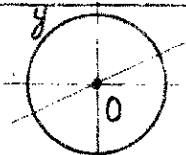
Полый шар

$$J_x = \frac{1}{10} M \cdot \left(\frac{D^5 - d^5}{D^3 - d^3} \right)$$




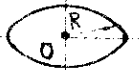

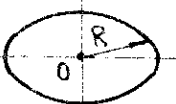
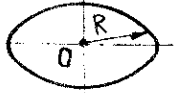
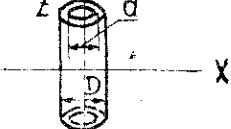
Полушар

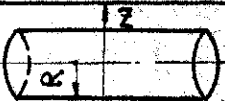
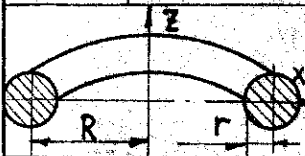
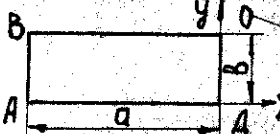
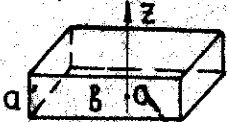
$$J_x = J_y = 0,4 MR^2$$



Поверхность шара

$$J_x = J_y = J_z = \frac{2}{3} MR^2$$

	<p>тонкий однородный стержень относительно оси AZ</p> $J = \frac{1}{3} M l^2$
	<p>тонкое круглое кольцо относительно CZ</p> $J = MR^2$
	<p>тонкая цилиндрическая оболочка относительно оси Z</p> $J = MR^2$
	<p>круглая однородная пластина или цилиндр относительно оси CZ</p> $J = \frac{1}{2} MR^2$
	<p>Круглая пластина малой толщины относительно оси CZ</p> $J = \frac{1}{4} MR^2$
	<p>Полый цилиндр</p> $J_z = M \left(\frac{D^2 + d^2}{8} \right)$ $J_x = M \left(\frac{D^2 + d^2}{16} + \frac{l^2}{12} \right)$

	Круглый цилиндр относительно, поперечной оси $J_z = \frac{1}{12} M (l^2 + 3R^2)$
	тор $J_z = M \cdot (R^2 + \frac{3}{4} r^2)$ $J_x = M \cdot (\frac{R^2}{2} + \frac{5}{8} r^2)$
	Прямоугольная пластина $J_x = \frac{1}{3} M b^2$; $J_y = \frac{1}{3} M a^2$
	Прямоугольный параллелепипед относительно оси sz $J = M \frac{a^2 + b^2}{12}$

Момент инерции относительно параллельной оси: $J = J_0 + M \cdot d^2$,

где J_0 - относительно оси, проходящей через центр тяжести; d - расстояние между осями.

Приведение сил, масс, моментов

Дифференциальные уравнения движения:

$$m_{np} \cdot a + \frac{v^2}{2} \cdot \frac{dm_{np}}{ds} = P_{ав} - R_{nc} - F_{тр}$$

$$J_{np} \cdot \epsilon + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_{np}}{d\varphi} = M_{ав} - M_{nc} - M_{тр}$$

Приведенная масса

$$m_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot v_{oi}^2 + \sum_{i=1}^n J_i \omega_i^2}{v_{np}^2}$$

v_o - скорость центра тяжести

$$J_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i v_{oi}^2 + \sum_{i=1}^n J_i \omega_i^2}{\omega_{np}^2} \quad \text{момент инерции;}$$

$$P_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i v_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n M_i \omega_i}{v_{np} \cos \alpha_{np}} \quad \text{— сила;}$$

$$M_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i v_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n M_i \omega_i}{\omega_{np}} \quad \text{— момент}$$

Удар

Ударный импульс $S_{уд} = \int_0^{\tau} p_{уд} \cdot dt$

Прямой центральный удар о неподвижную преграду $S = m(k+1) \cdot v$

Коэффициент восстановления $K = \frac{v}{v'}$

Сталь о сталь $K = \frac{5}{9}$ Сталь в холодном состоянии, $K = 0,5$; в горячем, — $K = 0$

а) абсолютно неупругий удар, $k=0$
 после удара $u_{1x} = u_{2x} = \frac{m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}$;

$$S_{2x} = -S_{1x} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_{1x} - v_{2x})$$

потерянная кинетическая энергия
 $T_1 = \frac{1}{2} m_1 (v_{1x} - u_x)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_{2x} - u_x)^2$ — Теорема Карно
 Потерянная T идет на местную деформацию, а T после удара — на деформацию системы.

б) абсолютно упругий удар, $k=1$

$$u_{1x} = v_{1x} - \frac{2m_2(v_{1x} - v_{2x})}{m_1 + m_2}; \quad u_{2x} = v_{2x} + \frac{2m_1(v_{1x} - v_{2x})}{m_1 + m_2}$$

$$S_{2x} = -S_{1x} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_{1x} - v_{2x}).$$

При $k \neq 0$

$$T_0 - T_1 = \frac{1-k}{1+k} \left[\frac{1}{2} m_1 (v_{1x} - u_{1x})^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_{2x} - u_{2x})^2 \right]$$

При ударе по вращающемуся телу

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{M_z(\bar{S})}{J_z}; \quad M_z(\bar{S}) - \text{момент ударного импульса}$$

Общие теоремы динамики:

1) изменение количества движения

$m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0 = \sum \vec{S}$; с его помощью решаются задачи, когда действующие силы постоянны или зависят только от времени.

$$\vec{Q} = m\vec{v}; \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \sum \vec{P}; \quad \text{если } \sum \vec{P} = 0, \quad \vec{Q} = \text{const.}$$

момент количества движения

$$\vec{K} = \sum M(m\vec{v}); \quad \frac{d\vec{K}}{dt} = \sum M(\vec{P}).$$

Если $\sum M(\vec{P}) = 0$, то $\vec{K} = \text{const.}$

$$|K| = \sum m_k v_k h_k = (\sum m_k h_k^2) \cdot \omega = J \cdot \omega.$$

2) изменение кинетической энергии

$$\frac{m v_1^2}{2} - \frac{m v_2^2}{2} = \sum A; \quad \text{с его помощью}$$

решаются задачи, когда действующие силы постоянны или зависят только от расстояния.

Скорость свободно падающего тела $v = \sqrt{2gH}$, где H - высота падения

КПД передач

$$\eta = \frac{A_{п.с.}}{A_{п.с.} + A_{в.с.}} = \frac{M_{п.с.}}{M_{дв.}} = \frac{F_{п.с.}}{F_{дв.}}$$

Резьбовые соединения

f - коэфф трения	Δ - угол подъема винт. линии				
	3°	6°	9°	12°	15°
0,1	0,34	0,51	0,6	0,66	0,71
0,15	0,26	0,4	0,5	0,57	0,6

Винт - сталь, гайка - бронза

Тип передачи	Опоры	
	скольжения	качения
Фрикционная:		
с гладкими шкивами	0,87	0,91
с клинчатыми шкивами	0,88	0,92
цепочная	0,92	0,94
цепные:		
простая сварная цепь		
смазанная	0,96 - 0,97	
без смазки	0,95 - 0,96	
калиброванная		
сварная (на звездочке)		
смазанная	0,94	
без смазки	0,926	
пластинчатая	0,95	

планетарные, $u=1-16$	0,96-0,99		
червячные	$Z=1$	$Z=2$	$Z=4$
	0,65-0,8	0,83-0,87	0,89-0,91
опоры вала	0,93-0,97	0,97-0,99	
Зубчатые:			
<u>Открытая</u>			
цилиндрическая с фрезеров. зубьями	0,93-0,95	0,95-0,96	
коническая	0,92-0,94	0,93-0,95	
<u>Закрытая</u>			
цилиндрическая с фрезеров. зубьями	0,93-0,96	0,96-0,98	
со шлифованными	0,98	0,99	
коническая	0,92-0,94	0,94-0,96	
Редукторы:			
Одноступенчатые с цилиндр. колесами		0,975-0,99	
с коническими		0,96-0,98	
<u>Открытые</u>			
с цилиндр. колесами		0,95-0,97	
с коническими		0,94-0,97	
двухступ. с цилиндр.		0,95-0,96	

Муфты: зубчатая дисковая фрикционная	0,99 0,95
Ременная: плоскоременная с натяжным роликом клиноременная (если D_m/δ - мало, а V - велика, где D_m - диаметр малого шкива, δ - толщина ремня)	0,97 0,99 0,95 0,95 - 0,96 0,85
Блоки, полчсасты	0,94-0,97 0,97-0,98
Дамкраты: винтовой гидравлический <u>зубчатый</u> с промежуточной зубчатой передачей без промежуточной	0,3 - 0,4 0,75 - 0,8 0,83 0,68 - 0,69
Кривошипно-ша- тунная передача	0,8 - 0,85

шарнирная передача п - число шарниров	0,95 ^п	
Канаты: стальной пеньковый / чем больше d, тем меньше к.п.д.)	0,95-0,97	0,98-0,985 0,94-0,98
Тормоза: к.п.д. рычажной системы ленточ- ных и колодочных тормозов с учётом трения в шарнирах	0,9-0,95 (большой со смазкой)	
барабаны: для стальных канатов для сварных цепей	0,94-0,96 0,95	0,96-0,98
цепные блоки для сварных цепей	0,95	0,97
Звездочки для пластинчатых цепей	0,95	0,97

ЛИТЕРАТУРА

1. С.М. Тарг. Краткий курс теоретической механики. „Наука.“ 1974г.
2. Л.Г. Лоуцянский, А.И. Лурье. Курс теоретической механики. ИТЛ. 1955г.
3. С.М. т 3. МАШГИЗ. 1962г.
4. Решетов Д.Н. Детали машин. „Машиностроение.“ 1974г.
5. Н.А. Спицын. И.И. Капканец. Детали машин и подъемно-транспортные машины. „Высшая школа.“ 1961г.
6. М.П. Александров. Подъемно-транспортные машины „Высшая школа.“ 1972г.
7. А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. Транспортирующие машины. „Машиностроение“ 1968г.
8. Л.Г. Кифер. И.И. Абрамович. Грузоподъемные машины. МАШГИЗ. 1957г.

Коэффициенты трения.

1. Коэффициенты трения скольжения [1]

Материалы трующихся пар	Коэффициенты трения			
	покоя		движения	
	насухо	смазка	насухо	смазка
Сталь-сталь	0,15	0,1-0,12	0,15	0,05-0,1
Сталь-чугун	0,3	-	0,18	0,05-0,15
Сталь-бронза	0,15	0,1-0,15	0,15	0,1-0,15
Чугун-чугун	-	0,18	0,15	0,07-0,12
Чугун-бронза	-	-	0,15-0,2	0,07-0,15
Бронза-бронза	-	0,1	0,2	0,07-0,1
Кожа-чугун	0,3-0,5	0,15	0,3	0,15
Резина-чугун	-	-	0,8	0,5

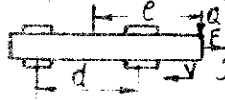
Для подшипников скольжения
(при слабой смазке) [2]

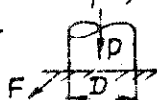
Сталь по чугуну марки СЧ	0,15-0,20
Сталь по баббиту	0,07-0,12
Сталь по текстолиту	0,15-0,25
Сталь по алюминиевому сплаву	0,10-0,15
Сталь по капрону и полиамидам	0,15-0,20

Жидкостное трение в подшипниках [5].
Коэф-т трения покоя (пусковой) - 0,14
при повышении скорости
достигает 0,005-0,008

2. Приведенные коэффициенты трения для некоторых подвижных соединений [1]

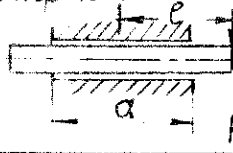
Стержень в двух опорах Торцевая опора



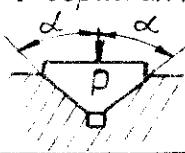
$$f_{np} = \frac{2l}{a} f$$


$$f_{np} = \frac{2}{3} f$$

Стержень в одной опоре V-образная направляющая

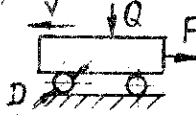
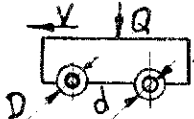


$$f_{np} = \frac{3l}{a} f$$

$$F = a \cdot f_{np}$$


$$f_{np} = \frac{f}{\sin \alpha}$$

Подкладные катки или колеса без учета трения в подшипниках

$$f_{np} = \frac{2K}{D}$$

K - коэффициент трения качения

Колеса с учетом трения в подшипниках

$$f_{np} = \frac{d \cdot f + 2K}{D}$$

3. Коэффициенты трения качения

Мягкая сталь - мягкая сталь $K = 0,005 \text{ см}$

Закаленная сталь - закаленная сталь $K = 0,001 \text{ см}$

Коэффициенты трения качения ходовых колес подъемных кранов [3]:

Диаметры ходовых колес	Материал ходовых колес	
	Сталь	Чугун
200 - 500 мм	0,03-0,06 см	0,04-0,07 см
600 - 800 мм	0,06-0,1 см	0,08-0,12 см

К-ты трения в подшипниках ходовых колес [4]

подшипники	К-т трения
скольжения:	
открытого типа	0,10
букса с жидкой смазкой	0,08
качения:	
шариковые и роликовые	0,015
конические	0,02

4. Коэффициенты трения в деталях, сопрягаемых с натягом [6]:
 при сборке под прессом - $f \approx 0,08$
 при сборке с нагревом охватывающей детали $f \approx 0,14$

5. Коэффициенты трения в болтовых соединениях - $f = 0,15 - 0,20$
 в тугих резьбовых соединениях (шпилька) $f = 0,02 - 0,05$
 Для заклепочных соединений с прямыми швами $f = 0,35 - 0,48$
 Для заклепочных соединений из легких сплавов $f = 0,15 - 0,20 \dots$ [3].

6. Печные толкатели: коэф-т трения металла по поду печи (по глассажным трубам) $f = 0,3 \dots$ [7].

7. Сталкиватели: коэф. трения между металлом и направляющими холодильника - $f = 0,25 \dots$ [7]

8. Ролиганги [7]

Коэф. трения ролика по металлу при буксовании:

для горячего металла $f = 0,3$

для холодного металла $f = 0,15 - 0,18$

Коэф. трения качения полосы по роликам.

для холодного металла $f = 1 \text{ мм}$

для горячих толстых полос и слитков $f = 1,5 - 2 \text{ мм}$

8. Трение в прокатном производстве [3]

Температура, $^{\circ}\text{C}$	скорость прокатки м/с				
	0,2	0,3-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,5
800	0,53-0,66	0,44-0,49	0,34-0,39	0,29-0,35	0,17-0,20
900	0,50-0,57	0,38-0,46	0,32-0,37	0,24-0,32	0,17-0,24
1000	0,45-0,54	0,37-0,44	0,28-0,34	0,25-0,29	0,17-0,23
1100	0,41-0,49	0,33-0,38	0,26-0,34	0,26-0,29	0,18-0,23
1200	0,40-0,43	0,37-0,38	0,31-0,34	0,22-0,27	0,18-0,21

Влияние смазки при холодной прокатке

Материал	без смазки	Керосин	Минерал. масло
Сталь 10	0,20-0,30	0,15-0,17	0,10-0,13
Медь	0,20-0,25	0,13-0,15	0,10-0,13
Алюминий	0,20-0,30	0,10-0,15	0,08-0,09
Латунь	0,12-0,15	0,06	0,05

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник машиностроителя,
т.1, Машгиз, 1960г.
2. С.А. Чернавский „Подшипники
скольжения“, Машгиз, 1963г.
3. И.В. Кразельский, И.Э. Виноградова
„Коэффициенты трения“, Машгиз 1962
4. М.П. Александров „Подъемно - транс-
портные машины“, Машгиз, 1960г.
5. Н.И. Колчик „Механика машин,
т.2, Машгиз, 1963г.
6. Справочник машиностроителя
т.4 Машгиз, 1963г.
7. А.А. Королев „Прокатные станы“
Машгиз, 1958г.

Электропривод [1-4]

Основные обозначения

$M_{\text{ем}}$ - статический момент на рабочей машине (Н·м)

M_n - номинальный момент электродвигателя,

M_i - статический момент на i -м участке графика нагрузки,

M_n, M_t - средние моменты электродвигателя, за время пуска и торможения,

n - число оборотов в

минуту,

t - время (сек),

CD^2 - приведенный маховой момент (кгс·м²),

ω - угловая скорость вращения (рад/сек)

J - момент инерции вращающихся масс относительно оси вращения (кг·м²)

i - общее передаточное число

η - КПД машины

Приведение статических моментов к валу электродвигателя

Энергия передается от электродвигателя к механизму

$$M_e = \frac{M_{cm}}{i_2}$$

Энергия передается от механизма к электродвигателю

$$M_c = \frac{M_{cm} i_2}{i}$$

Время разгона и торможения

$$t_p = \int_{P_{нач}}^{P_{кон}} \frac{GD^2}{38,2} \cdot \frac{dn}{M - M_c}, \quad t_T = \int_{P_{кон}}^{P_{нач}} \frac{GD^2}{38,2} \cdot \frac{dn}{M + M_c}$$

Для случая $M = \text{const}$,
 $M_c = \text{const}$, $GD^2 = \text{const}$

$$t_p = \frac{GD^2}{38,2} \cdot \frac{P_{кон} - P_{нач}}{M - M_c}, \quad t_T = \frac{GD^2}{38,2} \cdot \frac{P_{нач} - P_{кон}}{M + M_c}$$

В общем случае

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\omega} (M - M_c)$$

Определение мощности двигателя

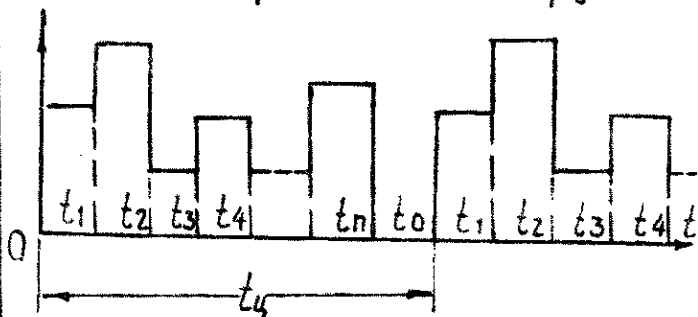
Для расчета двигателей по методу эквивалентного тока, момента и мощности следует применять формулы

$$J_3 = \sqrt{\frac{J_1^2 t_1 + J_2^2 t_2 + \dots + J_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}}$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}},$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0}},$$

которые представляют собой эквивалентные по нагреву величины, соответствующие графику циклической переменной нагрузки.



Условия правильного
выбора двигателей

$$J_3 \leq J_n, \quad M_3 \leq M_n, \quad P_3 \leq P_n.$$

Определение мощности
двигателей повторно-крат-
ковременного режима
работы

$$T_3 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}} \cdot \sqrt{\frac{P_B}{P_{Bн}}},$$

$$M_3 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n M_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}} \cdot \sqrt{\frac{P_B}{P_{Bн}}},$$

где $P_B\% = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{\sum_{k=1}^n t_k + t_0} \cdot 100\%.$

Для определения
допустимой частоты
включений асинхронных
двигателей с коротко-
замкнутым ротором
служит формула

$$Z = \frac{3600 \Delta P_H \{ [(1 - \beta_0) \varepsilon + \beta_0] - \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H} \varepsilon \}}{K_3 (\Delta A_n + \Delta A_T)},$$

где

ΔA_n и A_T - энергия, выделенная в двигателе при пуске и торможении,

$\Delta P_{K\tau}$ - энергия, выделенная в двигателе при установившейся скорости,

$K_3 = 2,5$ - коэффициент, учитывающий различие между теоретической и экспериментальной кривой нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Оптимальное по быстродействию передаточное отношение

$$i_{\text{опт}} = M_{\text{см}}/M + \sqrt{(M_{\text{см}}/M)^2 + J_c / K J_a},$$

$$K = 1,2.$$

Список литературы

1. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода - 5-е изд. М, Энергия, 1971. - 432 с.
2. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода - М. Энергия, 1979, 616 с.
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода, Издание шестое, М, Энергоиздат, 1981, 576 с.
4. Афанасьев В. Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве, М., "Металлургия", 1977, 280 с.

международная система единиц (СИ)

Таблица 1

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение русское	международн.
Основные единицы			
Длина	метр	м	m
масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура кельвина	Кельвин	К	K
Сила света	кандела	Кд	cd
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr
Производные единицы			
Площадь	квадратный метр	м ²	m ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³	m ³
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³

продолжение таблицы 1

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с
Сила, сила тя- жести (вес)	Ньютон	Н	N
Давление, механическое напряжение	Паскаль	Па	Pa
Работа; энергия; количество теплоты	Джоуль	Дж	J
Мощность; теп- ловой поток	Ватт	Вт	W
Количество электричества, электрический заряд	Кулон	Кл	C
Электрическое напряжение	Вольт	В	V
Электрическое сопротивление	Ом	Ом	Ω
Электрическая емкость	фарада	Ф	F
Магнитный поток	Вебер	Вб	Wb

продолжение таблицы 1

величина	Единица		
	наименование	русское	международное
Индуктивность	генри	л	н
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	дж/кг	ж/(кг·к)
Теплопроводность	ватт на метр кельвин	вт/(м·к)	w/(m·k)
световой поток	люмен	лм	лм
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²	cd/m ²
Освещенность	люкс	лк	лк

Соотношение механических единиц системы СИ с единицами других систем и с внесистемными единицами.

Единицы силы

$$1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$$

$$1 \text{ Т} = 10 \text{ кН}$$

$$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}$$

Единицы работы, энергии, теплоты

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Дж} \quad | \quad 1 \text{ Дж} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

$$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж} \quad | \quad 1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал}$$

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad | \quad 1 \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Единицы мощности

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 9,81 \text{ Вт} \quad | \quad 1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с}$$

$$1 \text{ л.с.} = 736 \text{ Вт} \quad | \quad 1 \text{ Вт} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ л.с.}$$

Единицы напряжения

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} (\text{Па}) = 0,1 \text{ МПа}$$

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} = 10^7 \text{ Па} = 10 \text{ МПа}$$

Модуль упругости первого рода $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$

Модуль сдвига $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$

Плотность стали

$$\gamma = 7,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3} = 7,8 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

Единицы давления

$$1 \text{ бар} = 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} (\text{Па})$$

$$1 \text{ мм. рт. ст} = 133,3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} (\text{Па})$$

$$1 \text{ ат} = 9,8 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} (\text{Па})$$

$$1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} (\text{Па})$$

Единицы угловой скорости

$$1 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$1 \frac{\text{об}}{\text{с}} = 2\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Единицы измерения температуры

$$n^{\circ}\text{C} = (n + 273,2)^{\circ}\text{K}$$

$$1^{\circ}\text{C} = 0,8^{\circ}\text{R} = 1,8^{\circ}\text{F} = 1^{\circ}\text{K}$$

(соотношение по масштабу)

$^{\circ}\text{F}$ — градусы шкалы Фаренгейта

$^{\circ}\text{K}$ — градусы Кельвина

$^{\circ}\text{C}$ — градусы Цельсия

$^{\circ}\text{R}$ — градусы Реомюра

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. ЛД и ПМ ~~А. С. Никитин~~ А. С. Никитин
руководитель работы

~~Братусь~~ А. Д. Братусь

~~Дудникова~~ Н. Л. Дудникова

~~Розлер~~ Г. М. Розлер

~~Шевченко~~ А. А. Шевченко

~~Юмина~~ С. В. Юмина

~~Толпина~~ Г. В. Толпина

~~Минц~~ Т. П. Минц

~~Фоменко~~ Г. Д. Фоменко

~~Кочнова~~ Т. Б. Кочнова

~~Миргородская~~ И. В. Миргородская