М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й  С Т А Н Д А Р Т

Расчеты и испытания на прочность

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

**ГОСТ 25.504—82**

Strength calculation and testing.
Methods of fatigue strength behaviour calculation

МКС 19.060
ОКСТУ 0803

**Дата введения 01.07.83**

Настоящий стандарт устанавливает методы расчета следующих характеристик сопротивления усталости деталей машин и элементов конструкций, изготовленных из сталей, в много- и малоцикловой упругой и упругопластической области:

- медианных значений пределов выносливости на базе $10^7$ циклов;
- пределов выносливости для заданной вероятности разрушения на базе $10^7$ циклов;
- коэффициента вариации пределов выносливости;
- показателя наклона левой ветви кривой усталости в двойных логарифмических координатах;
- абсциссы точки перелома кривой усталости;
- коэффициента чувствительности к асимметрии цикла напряжений;
- предельных амплитуд при асимметричных циклах нагружения;
- параметров уравнения кривой малоцикловой усталости (в пределах до $10^5$ циклов) при:

растяжении — сжатии, изгибе и кручении,

симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций, изменяющихся по простому периодическому закону с постоянными параметрами,

абсолютных размерах поперечного сечения детали до 300 мм,

наличии и отсутствии концентрации напряжений,

температуре от минус 40 °С до плюс 100 °С,

наличии и отсутствии агрессивной среды,

частоте нагружения в пределах 1—300 Гц.

Стандарт не распространяется на методы расчета характеристик сопротивления усталости сварных конструкций и их элементов.

Область применения стандарта ограничивается случаями, для которых в тексте стандарта и приложений имеются все исходные и справочные данные.

Выбор требуемой номенклатуры характеристик сопротивления много- и малоцикловой усталости определяется в каждом конкретном случае задачами и методом расчета по действующим в отраслях нормативно-техническим документам.

Термины, определения и обозначения, применяемые в стандарте, — по ГОСТ 23207.

Обозначения, применяемые в стандарте, приведены в приложении 1.

Размерность напряжений — МПа, геометрических размеров — мм.

Настоящий стандарт унифицирован со стандартами ГДР ТГЛ 19340/03 и ТГЛ 19340/04.

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

### 1.1. Определение медианных значений пределов выносливости

Медианные значения пределов выносливости деталей машины в номинальных напряжениях



gost.e-ecolog.ru

$\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}$ (соответствующие вероятности разрушения $P = 50$ %) определяют с учетом коэффициента снижения предела выносливости $K$ по формулам:

- при растяжении — сжатии или изгибе

$$\bar{\bar{\sigma}}_{1д} = \frac{\bar{\bar{\sigma}}_{-1}}{K}, \tag{1}$$

$$K = \left( \frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}, \tag{2}$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_{-1} = K_1 \cdot \bar{\bar{\sigma}}'_{-1}, \tag{3}$$

где $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}$ — медианное значение предела выносливости на совокупности всех плавок металла данной марки гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм, изготовленных из заготовок диаметром $d$, равным абсолютному размеру рассчитываемой детали;

$\bar{\bar{\sigma}}'_{-1}$ — медианное значение предела выносливости на совокупности всех плавок металла данной марки гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм, изготовленных из заготовок размерами 10—20 мм;

$K_1$ — коэффициент, учитывающий снижение механических свойств металла ($\sigma_В$, $\sigma_Т$, $\sigma_{-1}$) с ростом размеров заготовок (п. 1.3);

- при кручении

$$\bar{\bar{\tau}}_{1д} = \frac{\bar{\bar{\tau}}_{-1}}{K}, \tag{4}$$

$$K = \left( \frac{K_\tau}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}, \tag{5}$$

$$\bar{\bar{\tau}}_{-1} = K_1 \cdot \bar{\bar{\tau}}'_{-1}. \tag{6}$$

Медианные значения пределов выносливости деталей $\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}$, $\bar{\bar{\tau}}_{-1д}$, полученные по формулам (1) и (4) для $P = 50$ %, используют для оценки пределов выносливости деталей при любой заданной вероятности разрушения (разд. 2 и 3).

Примечания:

1. При наличии коррозионных воздействий в формулы (2) и (5) вместо $K_F$ следует подставлять значения $K_{кор}$.

2. При отсутствии экспериментальных данных ориентировочно величины $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}$, $\bar{\bar{\tau}}_{-1}$ допускается оценивать на основе соотношений:

$$\bar{\bar{\sigma}}_{-1} = (0{,}55 - 0{,}0001 \cdot \bar{\sigma}_В) \cdot \bar{\sigma}_В, \tag{7}$$

где $\bar{\sigma}_В$ — среднее значение предела прочности стали данной марки, определенное на образцах, изготовленных из заготовок диаметром $d$, равным абсолютному размеру рассчитываемой детали, МПа;

$$\bar{\bar{\tau}}_{-1} = 0{,}6 \cdot \bar{\bar{\sigma}}_{-1}. \tag{8}$$

### 1.2. Определение эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_\sigma$, $K_\tau$ и отношений $K_\sigma/K_{d\sigma}$, $K_\tau/K_{d\tau}$

1.2.1. Коэффициенты $K_\sigma$, $K_\tau$ и отношения $K_\sigma/K_{d\sigma}$, $K_\tau/K_{d\tau}$ определяют по экспериментальным данным или путем расчета.

1.2.2. Определение $K_\sigma$, $K_\tau$, $K_\sigma/K_{d\sigma}$ и $K_\tau/K_{\sigma\tau}$ — по экспериментальным данным.

Коэффициенты $K_\sigma$, $K_\tau$ могут определяться экспериментально на геометрически подобных образцах диаметром $d$ или толщиной $h$ поперечного сечения не менее 40 мм, если $d$ или $h$ рассчитываемой детали превышают это значение. Если $d$ или $h$ рассчитываемой детали меньше 40 мм, то при экспериментальном определении $K_\sigma$, $K_\tau$ целесообразно вести испытания на натурных деталях или моделях тех же поперечных размеров.

Для ряда деталей экспериментально полученные значения $K_\sigma$, $K_\tau$ и $K_\sigma/K_{d\sigma}$, $K_\tau/K_{d\tau}$ приведены в приложении 2 (черт. 1—7, 13—16).

Значения $(K_\sigma/K_{d\sigma})_0$ для валов с напрессованными деталями (при наличии коррозии трения) при изгибе представлены на черт. 1 приложения 2.

При $\sigma_B > 500$ МПа и $p < 30$ МПа следует учитывать соответствующие поправочные коэффициенты $\xi'$ и $\xi''$ (черт. 2, 3) и определять значения $K_\sigma/K_{d\sigma}$ по формуле

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}\right)_0 \cdot \xi' \cdot \xi'', \quad \frac{K_\tau}{K_{d\tau}} = 0{,}6\,\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}. \tag{10}*$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

1.2.3. Определение $K_\sigma$, $K_\tau$ и $K_\sigma/K_{d\sigma}$, $K_\tau/K_{d\sigma}$ методом расчета

1.2.3.1. Коэффициенты $K_\sigma$, $K_\tau$, $K_{d\tau}$, $K_{d\sigma}$ и отношение $\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{K_\tau}{K_{d\tau}}$ в случае отсутствия прямых экспериментальных данных могут быть вычислены по формулам (при известных значениях $\nu_\sigma$, $\nu_\tau$, $\alpha$ и $G$):

$$K_\sigma = \frac{(1 + \Theta_{t\Delta}^{-\nu_\sigma})\alpha_\sigma}{1 + \Theta^{-\nu_\sigma}}, \quad K_\tau = \frac{(1 + \Theta_{t\Delta}^{-\nu\tau})\alpha_\tau}{1 + \Theta^{-\nu\tau}}, \tag{11}$$

$$K_{d\sigma} = 0{,}5\,(1 + \Theta_{t\Delta}^{-\nu\sigma}) = \frac{1}{F(\Theta_{t\Delta};\,\nu_\sigma)},$$

$$K_{d\tau} = 0{,}5\,(1 + \Theta_{t\Delta}^{-\nu_\tau}) = \frac{1}{F(\Theta_{t\Delta};\,\nu_\tau)}, \tag{12}$$

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{2\alpha_\sigma}{1 + \Theta^{-\nu_\sigma}} = \alpha_\sigma \cdot F(\Theta_{t\Delta};\,\nu_\sigma),$$

$$\frac{K_\tau}{K_{d\tau}} = \frac{2\alpha_\tau}{1 + \Theta^{-\nu\tau}} = \alpha_\tau \cdot F(\Theta_{t\Delta};\,\nu_\tau), \tag{12а}$$

где $\Theta_{t\Delta} = \left(\frac{d_{t\Delta}}{7{,}5}\right)^2$ — значение относительного критерия подобия усталостного разрушения для гладкого (без концентрации напряжений) образца диаметром $d_{t\Delta}$, мм.

Определение относительного критерия подобия усталостного разрушения $\Theta$, величин $\nu_\sigma$, $\nu_\tau$ и функции $F(\Theta, \nu)$ приведено в пп. 1.5 и 1.8.

1.2.3.2. Если известны только величины $\alpha_\sigma$, $\alpha_\tau$ и $\overline{G}$, то $K_\sigma$ или $K_\tau$ вычисляют приближенно по формулам:

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{n}; \tag{13}$$

$$K_\tau = \frac{\alpha_\tau}{n}. \tag{14}$$

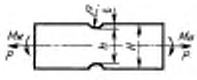
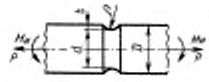
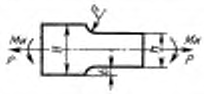
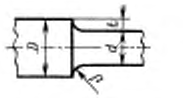
Коэффициент $n$ вычисляют по формуле

$$n = 1 + \sqrt{\overline{G}} \cdot 10^{-(0{,}33 + \frac{\sigma_\tau}{712})} \tag{15}$$

или по черт. 14 приложения 2 в зависимости от значений относительного градиента напряжений $\overline{G}$ (мм$^{-1}$), вычисленного по формулам, приведенным в табл. 1, и предела текучести $\sigma_\tau$ (МПа).

* Формула 9. **(Исключена, Изм. № 1).**

Таблица 1

| Деталь | | Формулы для вычисления $\bar{G}$, $\bar{G}_\tau$ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Изгиб | Растяжение—сжатие | Кручение |
|  | $\frac{H}{h} \geq 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2}{\rho} + \frac{2}{h}$ | $\bar{G} = \frac{2}{\rho}$ | — |
| | $\frac{H}{h} < 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2(1+\varphi)}{\rho} + \frac{2}{h}$ | $\bar{G} = \frac{2(1+\varphi)}{\rho}$ | |
|  | $\frac{D}{d} \geq 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2}{\rho} + \frac{2}{d}$ | $\bar{G} = \frac{2}{\rho}$ | $\bar{G}_\tau = \frac{1}{\rho} + \frac{2}{d}$ |
| | $\frac{D}{d} < 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2(1+\varphi)}{\rho} + \frac{2}{d}$ | $\bar{G} = \frac{2(1+\varphi)}{\rho}$ | $\bar{G}_\tau = \frac{1}{\rho} + \frac{2}{d}$ |
|  | $\frac{H}{h} \geq 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3}{\rho} + \frac{2}{h}$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3}{\rho}$ | — |
| | $\frac{H}{h} < 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3(1+\varphi)}{\rho} + \frac{2}{h}$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3(1+\varphi)}{\rho}$ | |
|  | $\frac{D}{d} \geq 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3}{\rho} + \frac{2}{d}$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3}{\rho}$ | $\bar{G}_\tau = \frac{1{,}15}{\rho} + \frac{2}{d}$ |
| | $\frac{D}{d} < 1{,}5$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3(1+\varphi)}{\rho} + \frac{2}{d}$ | $\bar{G} = \frac{2{,}3(1+\varphi)}{\rho}$ | $\bar{G}_\tau = \frac{1{,}15}{\rho} + \frac{2}{d}$ |
|  | | — | $\bar{G} = \frac{2{,}3}{\rho}$ | — |

Примечание. $\varphi = \frac{1}{4\sqrt{\frac{t}{\rho}} + 2}$.

1.2.3.3. В приближенных расчетах значения $K_\sigma$ и $K_\tau$ вычисляют по формулам:

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1), \tag{18}*$$

$$K_\tau = 1 + q(\alpha_\tau - 1), \tag{19}$$

где значения коэффициентов чувствительности металла к концентрации напряжений $q$ определяют по черт. 15 приложения 2.

**1.3. Определение коэффициентов $K_1$**

1.2.3.1—1.3. **(Измененная редакция, Изм. № 1).**

1.3.1. Коэффициент $K_1$ для легированных сталей определяют по черт. 16 приложения 2 или по формуле

$$K_1 = 1 - 0{,}2 \lg \frac{d}{d_0} \text{ для } d \leq 150 \text{ мм}, \tag{20}$$

где $d_0 = 7{,}5$ мм — диаметр гладкого лабораторного образца;

$K_1 = 0{,}74$ для $d > 150$ мм.

Для углеродистых сталей $K_1 = 1$.

1.3.2, 1.3.3. **(Исключены, Изм. № 1).**

* Формулы 16 и 17. **(Исключены, Изм. № 1).**

### 1.4. Определение теоретических коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_\sigma$, $\alpha_\tau$

1.4.1. Коэффициенты $\alpha_\sigma$, $\alpha_\tau$ определяют по теоретическим решениям или на основе измерений с помощью поляризационно-оптического метода, тензометрирования и т.п. (приложение 3, черт. 1—47).

1.4.2. Для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений в деталях, изображенных в табл. 2, могут быть использованы также номограммы, приведенные на черт. 48 и 49 приложения 3.

Примечания:

1. Пример использования номограмм для элементов с двусторонней внешней выточкой при изгибе.

Дано: $\rho = 2{,}5$ мм; $t = 15$ мм; $a = 95$ мм.

Находим $\sqrt{\frac{t}{\rho}} = 2{,}45$; $\sqrt{\frac{a}{\rho}} = 6{,}16$.

Как вытекает из табл. 2, для $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ нужно воспользоваться рядом чисел $b$, а для $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ — кривой 2. По черт. 48 от абсциссы $\sqrt{\frac{a}{\rho}} = 6{,}16$ начинаем двигаться по вертикали вверх до пересечения с кривой 2. Затем налево проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат. Точку пересечения соединяем с точкой $\sqrt{\frac{t}{\rho}} = 2{,}45$, находящейся на горизонтальной оси, при этом отсчет производим по ряду чисел $b$. Прямая касается круга, указывающего коэффициент концентрации $\alpha_\sigma = 4{,}28$.

2. Пример использования номограммы для элементов с внешней выточкой и осевым отверстием при изгибе.

Дано: $\rho = 4$ мм; $a = 13$ мм; $t = 36$ мм; $r = 25$ мм.

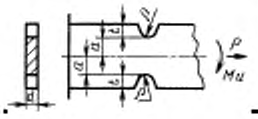
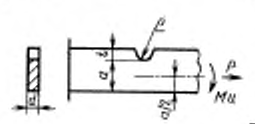
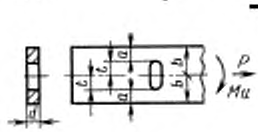
Находим $\sqrt{\frac{t}{\rho}} = 3$, $\sqrt{\frac{a}{\rho}} = 1{,}80$, $\sqrt{\frac{r}{\rho}} = 2{,}50$.

Как указано в примере 1 при $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ (ряд чисел $b$) и $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ (кривая 5) на черт. 48 находим $\alpha'_\sigma = 3{,}60$. Это будет теоретический коэффициент концентрации напряжений при большом осевом отверстии $(\alpha'_\sigma)_{r=\infty}$.

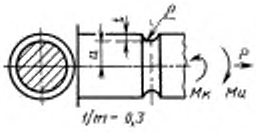
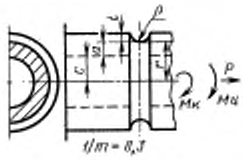
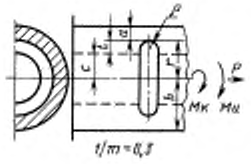
Теперь переходим к черт. 49 и смещаемся вверх по вертикали при значении $\sqrt{\frac{r}{\rho}} = 2{,}50$ до пересечения с кривой 2, затем налево по горизонтали до пересечения с осью. Точку пересечения соединяем с прямой $(\alpha'_\sigma)_{r=\infty} = 3{,}60$, лежащей на другой оси. Круг, которого касается эта прямая, дает $\alpha_\sigma = 2{,}08$.

Таблица 2

**Конструктивные случаи для определения теоретических коэффициентов концентрации $\alpha_\sigma$ и $\alpha_\tau$ по номограмме (приложение 3, черт. 48, 49)**

| Вид выточки или надреза | Вид напряжения | Формула номинального напряжения | Ряд чисел для параметра $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ | Кривая для параметра $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ | Кривая для параметра $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
|  | Растяжение | $\frac{P}{2da}$ | $b$ | 1 | — |
| | Изгиб | $\frac{3M_и}{2da^2}$ | $b$ | 2 | |
|  | Растяжение | $\frac{P}{da}$ | $b$ | 3 | — |
| | Изгиб | $\frac{6M_и}{da^2}$ | $b$ | 4 | |
|  | Растяжение | $\frac{P}{2da}$ | $b$ | 5 | — |
| | Изгиб | $\frac{3M_и \cdot t}{2d(b^3 - r^3)}$ | $a$ | 5 | |

*Продолжение табл. 2*

| Вид выточки или надреза | Вид напряжения | Формула номинального напряжения | Ряд чисел для параметра $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ | Кривая для параметра $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ | Кривая для параметра $\sqrt{\frac{t}{\rho}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
|  | Растяжение | $\frac{P}{\pi a^2}$ | $b$ | 6 | — |
| | Изгиб | $\frac{4M_и}{\pi a^3}$ | $b$ | 7 | |
| | Кручение | $\frac{2M_к}{\pi a^3}$ | $a$ | 9 | |
|  | Растяжение | $\frac{P}{\pi(r^2 - c^2)}$ | $b$ | 5 | 1 |
| | Изгиб | $\frac{4M_и r}{\pi(r^4 - c^4)}$ | $b$ | 5 | 2 |
| | Кручение | $\frac{2M_к \cdot r}{\pi(r^4 - c^4)}$ | $a$ | 10 | 4 |
|  | Растяжение | $\frac{P}{\pi(b^2 - r^2)}$ | $b$ | 5 | 5 |
| | Изгиб | $\frac{4M_и \cdot r}{\pi(b^2 - r^2)}$ | $b$ | 5 | 6 |
| | Кручение | $\frac{2M_к \cdot r}{\pi(b^4 - r^4)}$ | $a$ | 10 | 8 |

1.4.3. При обработке результатов на ЭВМ коэффициенты концентрации напряжений $\alpha_\sigma$ для деталей, указанных на черт. 20—22, 27 и 28 приложения 3, вычисляют по формуле

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{t/\rho} + B\,\frac{(1 + a/\rho)^2}{(a/\rho)^3} + \frac{C}{(t/\rho)^Z} \cdot \frac{a/\rho}{a/\rho + t/\rho}}}, \qquad (25)^*$$

где коэффициенты *A, B, C* и *Z* определяют по табл. 3 ($a = d/2$ или $a = b/2$), а в остальных случаях $\alpha_\sigma$ определяют по формулам, приведенным на черт. 1—3, 6—11, 14—19 приложения 3.

Примечание. Формула (25) является приближенной и дает отклонения до 10 %—20 % в запас прочности.

Таблица 3

**Значения коэффициентов для вычисления $\alpha_\sigma$ по формуле (25)**

| Коэффициенты | Форма образца (детали) | Двусторонний надрез (выточка) | | | Ступенчатый переход по галтели | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | изгиб | растяжение | кручение | изгиб | растяжение | кручение |
| *A* | Круглый | 0,20 | 0,22 | 0,7 | 0,62 | 0,62 | 3,4 |
| | Плоский | | | — | 0,50 | 0,50 | — |
| *B* | Круглый | 2,75 | 1,37 | 10,3 | 5,80 | 3,50 | 19,0 |
| | Плоский | 2,10 | 0,85 | — | 6,00 | 2,50 | — |

* Формулы 21—24. **(Исключены, Изм. № 1).**

*Продолжение табл. 3*

| Коэффициенты | Форма образца (детали) | Двусторонний надрез (выточка) | | | Ступенчатый переход по галтели | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | изгиб | растяжение | кручение | изгиб | растяжение | кручение |
| $C$ | Круглый | — | — | — | 0,20 | — | 1,0 |
| $Z$ | | | | | 3,00 | | 2,0 |

**1.5. Определение значения относительного критерия подобия усталостного разрушения**

1.5.1. Относительный критерий подобия Θ вычисляют по формуле

$$\Theta = \frac{\frac{L}{G}}{\left(\frac{L}{G}\right)_0} = \frac{1}{88{,}3} \cdot \frac{L}{G}, \qquad (26)$$

где $d_0 = 7{,}5$ мм; $\left(\frac{L}{G}\right)_0 = \frac{\pi d_0^2}{2} \approx 88{,}3$ мм$^2$;

$L$ выражается в мм,

$\overline{G}$ выражается в мм$^{-1}$.

Значения функции $F(\Theta, \nu) = \frac{2}{1 + \Theta^{-\nu}}$ приведены в табл. 4 или черт. 1 приложения 4.

Таблица 4

**Значения функции $F(\Theta, \nu)$**

| Θ | lg Θ | $F(\Theta, \nu) = \frac{2}{1+\Theta^{-\nu}}$ при ν | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
| 0,0032 | −2,5 | 0,885 | 0,774 | 0,720 | 0,668 | 0,569 | 0,480 |
| 0,0100 | −2,0 | 0,908 | 0,813 | 0,774 | 0,730 | 0,647 | 0,569 |
| 0,0316 | −1,5 | 0,931 | 0,863 | 0,829 | 0,796 | 0,730 | 0,668 |
| 0,1000 | −1,0 | 0,954 | 0,908 | 0,836 | 0,836 | 0,818 | 0,774 |
| 0,3162 | −0,5 | 0,977 | 0,954 | 0,942 | 0,931 | 0,908 | 0,885 |
| 1,0000 | 0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 3,1620 | 0,5 | 1,023 | 1,046 | 1,058 | 1,070 | 1,092 | 1,115 |
| 10,0000 | 1,0 | 1,046 | 1,092 | 1,115 | 1,137 | 1,182 | 1,226 |
| 31,6200 | 1,5 | 1,069 | 1,137 | 1,171 | 1,204 | 1,269 | 1,332 |
| 100,0000 | 2,0 | 1,092 | 1,182 | 1,226 | 1,269 | 1,353 | 1,430 |
| 316,2000 | 2,5 | 1,115 | 1,226 | 1,280 | 1,332 | 1,430 | 1,519 |
| 1000,0000 | 3,0 | 1,137 | 1,269 | 1,332 | 1,392 | 1,502 | 1,596 |
| 3162,0000 | 3,5 | 1,160 | 1,312 | 1,382 | 1,449 | 1,508 | 1,667 |
| 10000,0000 | 4,0 | 1,182 | 1,352 | 1,431 | 1,502 | 1,627 | 1,726 |

В формуле для определения $F(\Theta, \nu)$ параметр ν принимает значения $\nu_\sigma$ при изгибе и растяжении—сжатии и $\nu_\tau$ — при кручении.

**1.6. Определение параметра $L$**

1.6.1. При круговом изгибе или растяжении—сжатии, а также при кручении круглых стержней с кольцевыми канавками, с переходом от одного сечения к другому по галтели, с резьбой или гладких $L = \pi d$. При изгибе в одной плоскости круглых стержней $L = 0{,}08\ \pi d$.

Если при растяжении—сжатии или изгибе деталей только часть периметра рабочего сечения прилегает к зоне повышенной напряженности, то $L$ вычисляют по формулам, приведенным на черт. 2 приложения 4.

**1.7. Определение относительного градиента первого главного или касательного напряжений $\overline{G}$, $\overline{G}_\tau$**

Относительные градиенты напряжений $\overline{G}$, $\overline{G}_\tau$ определяют по формулам, приведенным в табл. 1.

**1.8. Определение коэффициентов чувствительности металла к концентрации напряжений и масштабному фактору $\nu_\sigma$ и $\nu_\tau$**

1.8.1. Значения $\nu_\sigma$, $\nu_\tau$ определяют по совокупности результатов испытаний на усталость образцов различных форм, размеров, уровней концентрации напряжений, изготовленных из металла одной плавки и испытанных при различных видах нагружения.

1.8.2. При отсутствии опытных данных для конструкционных сталей величину $\nu_\sigma$ приближенно вычисляют по формуле

$$\nu_\sigma = 0{,}211 - 0{,}000143\ \sigma_в \text{ при } \sigma_в \le 1300 \text{ МПа},$$
$$\nu_\sigma = 0{,}025 \text{ при } \sigma_в > 1300 \text{ МПа}. \qquad (27)$$

При кручении для конструкционных сталей величину $\nu_\tau$ приближенно принимают равной

$$\nu_\tau = 1{,}5 \cdot \nu_\sigma . \qquad (28)$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

**1.9. Определение коэффициентов влияния шероховатости поверхности $K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$**

1.9.1. Значения коэффициента $K_{F\sigma}$, характеризующего снижение пределов выносливости при ухудшении качества обработки поверхности в зависимости от предела прочности и чистоты поверхности, для изгиба и растяжения—сжатия, определяют по черт. 3 приложения 4 или вычисляют по формуле

$$K_{F\sigma} = 1 - 0{,}22 \cdot \lg R_z \left(\lg \frac{\sigma_в}{20} - 1\right) \quad (\sigma_в \text{ в МПа}). \qquad (29)$$

1.9.2. Значения коэффициента $K_{F\tau}$ вычисляют по формуле

$$K_{F\tau} = 0{,}575 \quad K_{F\sigma} + 0{,}425. \qquad (30)$$

**1.10. Определение коэффициента $K_{кор}$**

1.10.1. Коэффициент $K_{кор}$, характеризующий снижение предела выносливости от влияния коррозии до испытания на усталость, приведен в зависимости от предела прочности на черт. 4 приложения 4.

На кривых указано количество дней, в течение которых образец подвергался воздействию коррозионной среды (пресной воды) до испытания на усталость.

1.10.2. Влияние коррозии при одновременном действии коррозионной среды и переменных напряжений представлено в виде зависимости коэффициента $K_{кор}$ от предела прочности стали на черт. 5 приложения 4.

1.10.3. Коэффициенты $K_{кор}$ соответствуют определенной частоте испытания и числу циклов, указанных в подрисуночных подписях. При других частотах и базах испытания следует вводить поправки в соответствии с экспериментальными данными.

**1.11. Определение коэффициента влияния поверхностного упрочнения $K_\nu$ и коэффициента анизотропии $K_A$**

1.11.1. Методика определения коэффициента влияния поверхностного упрочнения $K_\nu$ приведена в приложении 5.

1.11.2. Коэффициенты анизотропии, приведенные в табл. 5, учитывают, если первое главное напряжение при изгибе и растяжении—сжатии направлено перпендикулярно направлению прокатки материала.

При кручении анизотропию не учитывают.

Таблица 5

**Значения коэффициентов анизотропии $K_A$**

| $\sigma_в$, МПа | $K_A$ | $\sigma_в$, МПа | $K_A$ |
|---|---|---|---|
| До 600 | 0,90 | Св. 900 до 1200 | 0,83 |
| Св. 600 до 900 | 0,86 | » 1200 | 0,80 |

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ $[\sigma_{-1д}]_P$

2.1. При наличии достаточного объема статистической информации для оценки коэффициента вариации пределов выносливости деталей машин ($v_{\sigma_{-1д}}$ или $v_{\tau_{-1д}}$), используя вычисленное для заданной базы по формуле (1) или (4) медианное значение предела выносливости детали ($\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}$ или $\bar{\bar{\tau}}_{-1д}$), определяют пределы выносливости детали на той же базе для любых заданных вероятностей разрушения $P$ в предположении справедливости нормального закона распределения по формулам:

$$(\sigma_{-1д})_P = \bar{\bar{\sigma}}_{-1д} \cdot (1 + z_p \cdot v_{\sigma_{-1д}}), \tag{31}$$

$$(\tau_{-1д})_P = \bar{\bar{\tau}}_{-1д} \cdot (1 + z_p \cdot v_{\tau_{-1д}}), \tag{32}$$

где $z_P$ — квантиль нормального распределения, соответствующая заданной вероятности разрушения $P$.

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВАРИАЦИИ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Коэффициент вариации предела выносливости детали вычисляют по формуле

$$v_{\sigma_{-1д}} = \frac{S_{\sigma_{-1д}}}{\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}}, \tag{33}$$

где $S_{\sigma_{-1д}}$ и $\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}$ — среднее квадратическое отклонение и среднее (на совокупности всех плавок) значение предела выносливости детали соответственно.

Результирующий коэффициент вариации предела выносливости детали при отсутствии сварки, поверхностного упрочнения и при стабильной технологии вычисляют по формуле

$$v_{\sigma_{-1д}} = \sqrt{v^2_{\sigma_{max}} + v^2_{\bar{\sigma}_{-1}} + v^2_{\alpha_\sigma}}, \tag{34}$$

где $v_{\sigma_{max}}$ — коэффициент вариации максимальных разрушающих напряжений в зоне концентрации, соответствующий пределам выносливости деталей (при испытании идентичных деталей, изготовленных из металла одной плавки, связанный со структурой неоднородностью металла (наличием различных фаз, включений, искажений кристаллической решетки и т. д.);

$v_{\bar{\sigma}_{-1}}$ — коэффициент вариации средних (в пределах одной плавки) значений пределов выносливости гладких лабораторных образцов диаметром 7,5 мм, учитывающий межплавочное рассеяние механических свойств металла и вычисляемый по формуле

$$v_{\bar{\sigma}_{-1}} = \frac{S_{\bar{\sigma}_{-1}}}{\bar{\bar{\sigma}}_{-1}}, \tag{35}$$

$$S_{\bar{\sigma}_{-1}} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\bar{\sigma}_{-1i} - \bar{\bar{\sigma}}_{-1})^2}; \tag{36}$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_{-1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\bar{\sigma}_{-1i}, \tag{37}$$

где $\bar{\sigma}_{-1i}$ — значение $\bar{\sigma}_{-1}$ для $i$-й плавки;

$n$ — число плавок;

$v_{\alpha_\sigma}$ — коэффициент вариации теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma$, учитывающий отклонения фактических размеров деталей (особенно в зонах концентрации напряжений) от номинальных (в пределах допусков).

При нестабильной технологии, неоднородности свойств металла, наличии остаточных напряжений и технологических дефектов коэффициенты вариации предела выносливости деталей $v_{\sigma_{-1д}}$ определяют путем проведения усталостных испытаний деталей.

**3.2. Определение коэффициентов вариации $v_{\sigma_{max}}$**

3.2.1. При достаточно стабильной технологии, однородности свойств металла в объеме детали, отсутствии остаточных напряжений коэффициенты вариации максимальных разрушающих напряжений $v_{\sigma_{max}}$ вычисляют по формуле

$$v_{\sigma_{max}} \approx \frac{0{,}1}{1 + \Theta_{\sigma}^{v}}, \tag{38}$$

**3.3. Определение коэффициентов вариации $v_{\bar{\sigma}_{-1}}$**

Коэффициент $v_{\bar{\sigma}_{-1}}$ определяют по статистическим данным о межплавочном рассеянии пределов выносливости по формулам (35)—(37).

Если данных по межплавочному рассеянию величин $\bar{\sigma}_{-1}$ нет, то, учитывая практически линейную зависимость между пределами выносливости и пределами прочности, в первом приближении допускают

$$v_{\bar{\sigma}_{-1}} = v_{\sigma_{в}},$$

где $v_{\sigma_{в}}$ — коэффициент вариации предела прочности металла на множестве всех плавок ($v_{\sigma_{в}} = 0{,}04—0{,}10$).

**3.4. Определение коэффициентов вариации $v_{\alpha_{\sigma}}$**

3.4.1. Колебания радиусов кривизны в зоне концентрации напряжений $\rho$ характеризуются коэффициентами вариации $v_{\rho}$. Коэффициенты вариации находят по результатам измерения партии деталей (не менее 30—50 шт.) в условиях производства.

3.4.2. Среднее значение $\bar{\rho}$, среднее квадратическое отклонение $s_{\rho}$ радиуса кривизны $\rho$ и коэффициент вариации $v_{\rho}$ вычисляют по формулам:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \rho_i, \tag{39}$$

$$s_{\rho} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\rho_i - \bar{\rho})^2}, \tag{40}$$

$$v_{\rho} = \frac{s_{\rho}}{\bar{\rho}}. \tag{41}$$

Зависимость $\alpha_{\sigma}$ от $\rho$ представляют функцией

$$\alpha_{\sigma} = \varphi(\rho). \tag{42}$$

Коэффициент вариации $v_{\alpha_{\sigma}}$ вычисляют по формуле

$$v_{\alpha_{\sigma}} \approx \left|\frac{\partial \varphi}{\partial \rho}\right|_{0} \cdot \frac{\bar{\rho}}{\bar{\alpha}_{\sigma}} \cdot v_{\rho}, \tag{43}$$

где $\bar{\alpha}_{\sigma}$ — среднее значение $\alpha_{\sigma}$, соответствующее $\rho = \bar{\rho}$;

$\left|\frac{\partial \varphi}{\partial \rho}\right|_{0}$ — абсолютное значение производной, которое соответствует средним значениям определяющих параметров.

3.4.3. Для нахождения производной в выражении (43) допускается осуществлять линейную аппроксимацию функции (42) в окрестности заданных значений параметров, используя уравнение прямой, проходящей через две точки

$$\frac{\alpha_{\sigma} - \alpha_{\sigma_1}}{\alpha_{\sigma_2} - \alpha_{\sigma_1}} = \frac{\frac{\rho}{d} - \left(\frac{\rho}{d}\right)_1}{\left(\frac{\rho}{d}\right)_2 - \left(\frac{\rho}{d}\right)_1}, \tag{44}$$

где $\frac{\rho}{d}$ — заданное значение отношения параметров $\rho$ и $d$ (вместо $\rho/d$ может быть $\rho/t$ и т. п.);

$\left(\frac{\rho}{d}\right)_2 > \frac{\rho}{d}$ и $\left(\frac{\rho}{d}\right)_1 < \frac{\rho}{d}$ — отношения $\frac{\rho}{d}$, близкие к заданному значению;

$\alpha_{\sigma_2}$ и $\alpha_{\sigma_1}$ — значения $\alpha_\sigma$, соответствующие $(\rho/d)_2$ и $(\rho/d)_1$.

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ $m$ И $N_G$ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАПРЯЖЕНИЙ $\Psi_\sigma$ И $\Psi_\tau$

4.1. Для расчета на прочность левую наклонную часть кривой усталости представляют в виде

$$\sigma^m \cdot N = \sigma_{-1д}^m \cdot N_G, \tag{45}$$

где $m$ — показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах;

$N_G$ — абсцисса точки перелома кривой усталости.

4.2. Величина $N_G$ в большинстве случаев колеблется в пределах $N_G = 10^6 — 3 \cdot 10^6$ циклов. В расчетах на прочность при переменных напряжениях, когда отсутствуют данные натурных усталостных испытаний, принимают в среднем $N_G = 2 \cdot 10^6$ циклов.

4.3. Величины $m$ для деталей изменяются в пределах 3—20, при этом с ростом коэффициента снижения предела выносливости $K$ уменьшается $m$. Зависимость между $K$ и $m$ принимают приближенно в виде

$$m = \frac{C}{K}, \tag{46}$$

где

$$C = 5 + \frac{\sigma_в}{80} (\sigma_в \text{ в МПа}). \tag{47}$$

4.4. Значения $\Psi_\sigma$ и $\Psi_\tau$ вычисляют по формулам:

$$\Psi_\sigma = 0{,}02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_в, \tag{48}$$

$$\Psi_\tau = 0{,}01 + 10^{-4} \cdot \sigma_в, \tag{49}$$

где $\sigma_в$ в МПа.

Для деталей с концентрацией напряжений коэффициенты влияния асимметрии цикла $\Psi_{\sigma_д}$ и $\Psi_{\tau_д}$ вычисляют по формулам:

$$\Psi_{\sigma_д} = \frac{\Psi_\sigma}{K}, \quad \Psi_{\tau_д} = \frac{\Psi_\tau}{K}, \tag{50}$$

где $K$ — коэффициент, определяемый по формулам (2), (5).

Для легированных сталей допускается вычислять коэффициенты $\Psi_{\sigma_д}$ и $\Psi_{\tau_д}$ по формулам:

$$\Psi_{\sigma_д} = \frac{\sigma_{-1д}}{2\sigma_в - \sigma_{-1д}}, \tag{51}$$

$$\Psi_{\tau_д} = \frac{\tau_{-1д}}{2\sigma_в - \tau_{-1д}}. \tag{52}$$

4.5. Предельные амплитуды для деталей при асимметричном цикле нагружения вычисляют по формулам:

$$\sigma_{ад} = \sigma_{-1д} - \Psi_{\sigma_д} \cdot \sigma_m, \tag{53}$$

$$\tau_{ад} = \tau_{-1д} - \Psi_{\tau_д} \cdot \tau_m. \tag{54}$$

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

5.1. Расчет малоцикловой долговечности выполняется на основе анализа местных деформаций. К малоцикловой относят область чисел циклов до разрушения $< 5 \cdot 10^4 — 10^5$, когда становится выраженным упругопластический характер деформированного состояния конструкции. Рассматривают условия нагружения, при которых максимальные деформации достигают 0,5 %—1,0 %.

5.2. При определении малоцикловой долговечности и оценке накопления повреждений должны быть следующие данные:

- циклические упругопластические и односторонне накопленные деформации в максимально напряженных зонах конструкции:
- располагаемая пластичность материала $\varepsilon_f$;
- кривая малоцикловой усталости конструкционного материала ($N = f(\varepsilon)^{(k)}$).

**5.3. Определение напряжений и деформаций**

5.3.1. Напряженно-деформированное состояние и его поцикловое изменение в максимально напряженных зонах конструкции определяют расчетным или экспериментальным методами, в том числе по данным тензометрических измерений на моделях и натурных конструкциях для заданных или эквивалентных нагрузок.

5.3.2. Расчетное определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкций выполняется решением соответствующих задач малоциклового нагружения в циклической упруго-пластической постановке либо в замкнутой форме, либо численными методами.

5.3.3. Для приближенных оценок малоцикловой прочности элементов конструкций, работающих при нагрузках, вызывающих в зонах концентрации напряжений выход материала за пределы упругости, деформации и напряжения приближенно определяют с использованием интерполяционных зависимостей типа

$$K_\sigma^{(0)} \cdot K_\varepsilon^{(0)} = \alpha_\sigma^2, \qquad (k = 0), \tag{55}$$

$$K_S^{(k)} \cdot K_\varepsilon^{(k)} = \alpha_\sigma^2, \qquad (k = 1 \ldots), \tag{56}$$

где $K_\sigma^{(0)} = \frac{\sigma_{\max}^{(0)}}{\sigma_н}$ — упругопластический коэффициент концентрации напряжений;

$K_\varepsilon^{(0)} = \frac{e_{\max}^{(0)}}{e_н}$ — упругопластический коэффициент концентрации деформаций;

$K_S^{(k)} = \frac{S_{\max}^{(k)}}{S_н}$ — циклический упругопластический коэффициент концентрации напряжений;

$K_\varepsilon^{(k)} = \frac{\varepsilon_{\max}^{(k)}}{\varepsilon_н}$ — циклический упругопластический коэффициент концентрации деформаций.

Зависимость используется для $\alpha_\sigma \le 3{,}5$. При бóльших значениях $\alpha_\sigma$ применение формулы дает результаты, идущие в запас прочности.

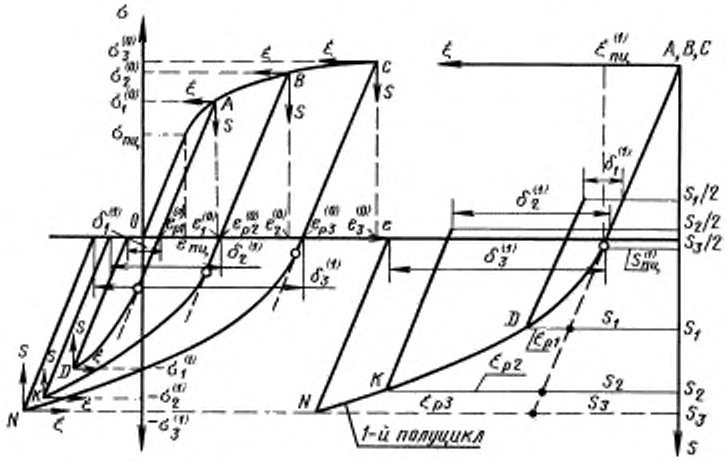
Для вычисления значения циклических упругопластических коэффициентов концентрации $K_S^{(k)}$ и $K_\varepsilon^{(k)}$, кроме известных значений теоретического коэффициента концентрации $\alpha_\sigma$, необходимо знать зависимость напряжения от деформации при циклическом упругопластическом деформировании.

**5.4. Определение диаграмм статического и циклического деформирования**

5.4.1. Диаграмма статического и циклического деформирования характеризует зависимость напряжения от деформации при статическом или циклическом нагружении. Диаграммы деформирования определяют по данным испытаний при статическом или циклическом нагружении, проводимых по ГОСТ 25.502 и ГОСТ 1497.

5.4.2. Аналитически диаграммы циклического деформирования интерпретируют в форме обобщенной диаграммы циклического деформирования. Обобщенная диаграмма циклического деформирования отражает зависимость напряжения от деформации по параметру числа полуциклов нагружения. Диаграмму рассматривают в координатах $S$— $\varepsilon$ (черт. 1). Основное свойство обобщенной диаграммы заключается в том, что для мягкого, жесткого и промежуточных между мягким и жестким нагружениями все конечные и текущие точки диаграмм деформирования $k$-го полуцикла нагружения, полученные при различных уровнях исходных деформаций, укладываются на одну и ту же для данного полуцикла нагружения кривую. Схема обобщенной диаграммы деформирования приведена на черт. 1.

**Схема обобщенной диаграммы циклического деформирования**




Черт. 1

Исходное нагружение происходит в соответствии с диаграммой статического деформирования *O, A, B, C*, рассматриваемой в координатах σ—*e* с началом в точке *O*. Процесс исходного нагружения доводят до определенного значения напряжений и деформаций, например до состояний *A, B, C*. Таким образом напряжения исходного нагружения составят $\sigma_1^{(0)}$, $\sigma_2^{(0)}$ и $\sigma_3^{(0)}$, а деформации — $e_1^{(0)}$, $e_2^{(0)}$ и $e_3^{(0)}$ соответственно. После разгрузки, происходящей в соответствии с модулем упругости материала, остаются величины пластических деформаций $e_{p1}^{(0)}$, $e_{p2}^{(0)}$ и $e_{p3}^{(0)}$. Исходное нагружение и разгрузка образуют нулевой ($k = 0$) полуцикл нагружения.

Реверс нагружения происходит по своей для каждой степени исходного нагружения диаграмме деформирования, достигая, например, состояний *D, K, N*, соответствующих напряжениям $-\sigma_1^{(1)}$, $-\sigma_2^{(1)}$ и $-\sigma_3^{(1)}$, причем для симметричного цикла мягкого нагружения $|-\sigma_1^{(1)}| = |\sigma_1^{(0)}|$, $|-\sigma_2^{(1)}| = |-\sigma_2^{(0)}|$ и $|-\sigma_3^{(1)}| = |\sigma_3^{(0)}|$. Реверсивное нагружение и последующая разгрузка образуют первый ($k = 1$) полуцикл нагружения, а совокупность нулевого и первого полуциклов — первый ($N = 1$) цикл нагружения.

Обобщенная диаграмма циклического деформирования строится для каждого отдельного полуцикла нагружения в координатах *S*—ε с началом в точке разгрузки и для каждого рассматриваемого состояния нагружения. Для первого ($k = 1$) полуцикла нагружения (при исходных уровнях напряжений $\sigma_1^{(0)}$, $\sigma_2^{(0)}$ и $\sigma_3^{(0)}$) начало координат *S*—ε помещают в точки *A, B, C*. При этом кривая деформирования рассматриваемого полуцикла включает в себя участок нагружения этого полуцикла и участок разгрузки предыдущего.

Для построения обобщенной диаграммы циклического деформирования точки начала разгрузки для данного полуцикла нагружения совмещают. На правой части черт. 1 для $k = 1$ точки *A, B, C* совмещены и образована единая зависимость между напряжениями и деформациями *A, B, C, D, K, N*.

Аналогичные построения делают и для последующих полуциклов нагружения. В общем случае, в связи с процессами циклического упрочнения или разупрочнения материала, обобщенные диаграммы деформирования для различных полуциклов нагружения отличаются друг от друга. Обобщенная диаграмма циклического деформирования оказывается неизменной (начиная с $k = 1$) только для циклически стабильных материалов.

5.4.3. Для приближенных расчетов допускается использовать диаграммы циклического деформирования, образуемые удвоением статической диаграммы деформирования материала.

5.4.4. Аппроксимация диаграмм деформирования выполняется для расчетных приложений степенными функциями:

$$\frac{\sigma^{(0)}}{\sigma^{(0)}_{\text{пц}}} = \left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} \text{ и } \frac{S^{(k)}}{\sigma^{(0)}_{\text{пц}}} = \left(\frac{\varepsilon^{(k)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(k)} \tag{57}$$

(при $\sigma^{(0)} > \sigma^{(0)}_{\text{пц}}$ и $S^{(k)} > 2\sigma^{(0)}_{\text{пц}}$),

где $\sigma^{(0)}_{\text{пц}}$ и $e^{(0)}_{\text{пц}}$ — напряжение и деформация предела пропорциональности материала при статическом нагружении;

$m^{(0)}$ и $m^{(k)}$ — показатели упрочнения материала в упругопластической области, определяемые по диаграммам статического и циклического деформирования при степенной аппроксимации.

При этом циклический модуль упрочнения имеет вид:

$$m^{(k)} = \lg\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} / \lg\left[\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} + \frac{\bar{A}}{2}\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}} - 1\right)\frac{1}{k^{\alpha}}\right] - \tag{58}$$

для циклически упрочняющихся материалов, для которых $m^{(k-1)} < m^{(k)}$;

$$m^{(k)} = \lg\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} / \lg\left[\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} + \frac{\bar{A}}{2}\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}} - 1\right)e^{\beta(k-1)}\right] - \tag{59}$$

для циклически разупрочняющихся материалов, для которых $m^{(k-1)} > m^{(k)}$;

$$m^{(k)} = \lg\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} / \lg\left[\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}\right)^{m(0)} + \frac{\bar{A}}{2}\left(\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}} - 1\right)\right] - \tag{60}$$

для циклически стабилизирующихся материалов, у которых $m^{(k-1)} = m^{(k)}$.

При линейной аппроксимации диаграммы статического и циклического деформирования имеют вид:

$$\frac{\sigma^{(0)}}{\sigma^{(0)}_{\text{пц}}} = (1 - E^{(0)}_{\tau}) + E^{(0)}_{\tau}\frac{e^{(0)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}}, \quad \frac{S^{(k)}}{\sigma^{(0)}_{\text{пц}}} = 2(1 - E^{(k)}_{\tau}) + E^{(k)}_{\tau}\frac{\varepsilon^{(k)}}{e^{(0)}_{\text{пц}}} \tag{61}$$

(при $\sigma^{(0)} > \sigma^{(0)}_{\text{пц}}$ и $S^{(k)} > 2\sigma^{(0)}_{\text{пц}}$),

где $E^{(0)}_{\tau}$ и $E^{(k)}_{\tau}$ — показатели упрочнения материала в упругопластической области, определяемые по диаграмме статического и циклического деформирования при линейной аппроксимации;

$E^{(k)}_{\tau} = 1/(1 + \frac{\bar{A}}{2E^{(0)}_{\tau}} \cdot \frac{1}{k^{\alpha}})$ — для циклически упрочняющихся материалов;

$E^{(k)}_{\tau} = 1/(1 + \frac{\bar{A}}{2E^{(0)}_{\tau}} \cdot e^{\beta(k-1)})$ — для циклически разупрочняющихся материалов;

$E^{(k)}_{\tau} = 1/(1 + \frac{\bar{A}}{2E^{(0)}_{\tau}})$ — для циклически разупрочняющихся материалов.

5.4.5. По статическим диаграммам деформирования определяют пределы пропорциональности, текучести и прочности, равномерное и общее удлинение (ГОСТ 1497), по диаграммам циклического деформирования — пределы пропорциональности и текучести по параметру числа циклов или полуциклов нагружения, коэффициенты $\bar{A}$, $\alpha$, $\beta$, характеризующие сопротивление циклическому деформированию, циклическое упрочнение, разупрочнение, стабилизацию.

5.4.6. Коэффициент $\bar{A}$ характеризует связь между деформацией исходного нагружения $e^{(0)}$ и шириной петли гистерезиса $\delta^{(1)}$ в первом полуцикле при мягком нагружении. Определяют из выражения

$$\bar{A} = \delta^{(1)}/(e^{(0)} - e^{(0)}_{\text{пц}}). \tag{62}$$

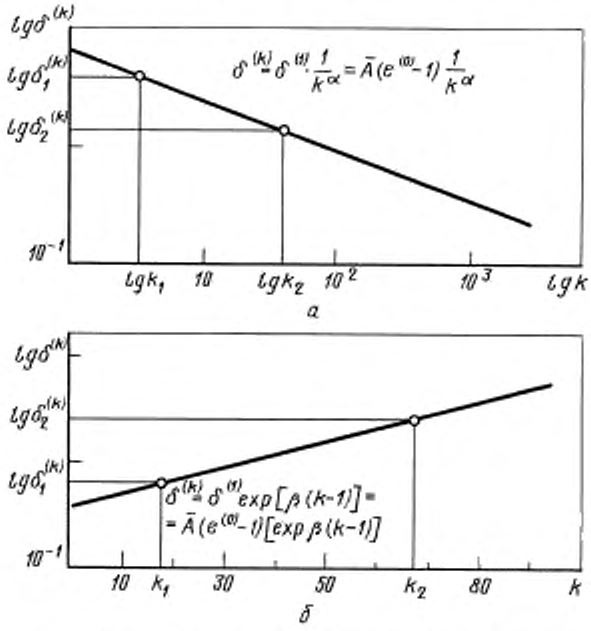
Полученную совокупность экспериментальных величин $\bar{A}$ (по результатам испытания серии порядка 5—10 образцов при различных значениях исходной деформации $e^{(0)}$) обрабатывают с использованием метода наименьших квадратов или другим способом осреднения.

5.4.7. Коэффициенты $\alpha$ и $\beta$ определяют по полученным при мягком нагружении экспериментальным данным $\lg \delta^{(k)} - \lg k$ (для случая циклического упрочнения) и $\lg \delta^{(k)} - k$ (для циклического разупрочнения). Величины $\alpha$ или $\beta$ для рассматриваемого образца вычисляют по формулам (черт. 2):

$$\alpha = \frac{\lg \delta_1^{(k)} - \lg \delta_2^{(k)}}{\lg k_2 - \lg k_1}, \quad \beta = \frac{\lg \delta_2^{(k)} - \lg \delta_1^{(k)}}{k_2 - k_1} \cdot \frac{1}{\lg e}, \tag{63}$$

где $\delta^{(k)}$ — ширина петли гистерезиса в $k$-м полуцикле нагружения.

**Зависимость ширины петли гистерезиса от числа полуциклов нагружения**




а — циклическое упрочнение; б — циклическое разупрочнение

Черт. 2

Для расчетов в заданном диапазоне максимальных деформаций рекомендуется применять средние коэффициенты $\alpha$ и $\beta$, полученные при различных значениях исходных деформаций в заданном диапазоне.

**5.5. Определение располагаемой пластичности материала**

5.5.1. Располагаемую пластичность материала ($\varepsilon_f$) определяют как

$$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - \Psi_в} \text{ или } \varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - \Psi}, \tag{64}$$

где $\Psi_в$ и $\Psi$ — коэффициенты уменьшения поперечного сечения, соответствующие достижению предела прочности или разрыву образца. Определяют по ГОСТ 1497.

**5.6. Определение кривой малоцикловой усталости**

5.6.1. Кривую малоцикловой усталости определяют экспериментально по результатам испытаний серии образцов при жестком нагружении по ГОСТ 25.502. Результаты представляют в виде зависимости долговечности от циклической упругопластической или пластической деформации.

5.6.2. Аналитически кривую малоцикловой усталости выражают уравнениями:

$$\varepsilon_p^{(k)} = \overline{C} \cdot N^{-\mu}, \tag{65}$$

$$\varepsilon^{(k)} = \overline{C} \cdot N^{-\mu} + \frac{2\sigma_{-1}}{E}, \tag{66}$$

$$\varepsilon^{(k)} = \varepsilon_e^{(k)} + \varepsilon_p^{(k)} = \overline{B} \cdot N^{-0,12} + \overline{D}^{0,6} \cdot N^{-0,6}. \quad (67)$$

При этом зависимость долговечности от циклической пластической деформации ($\varepsilon_p^{(k)}$) используют в диапазоне чисел циклов $< 10^3$—$5 \cdot 10^3$.

Зависимость долговечности от циклических упругопластических деформаций ($\varepsilon^{(k)}$) применяют во всем малоцикловом диапазоне чисел циклов нагружения ($< 5 \cdot 10^4$—$10^5$).

Коэффициенты в уравнениях определяют по экспериментальным данным о долговечности при малоцикловом нагружении с симметричным циклом деформаций.

5.6.3. Для приближенных расчетов кривой малоцикловой усталости используют корреляционные зависимости, устанавливающие связь характеристик сопротивления малоцикловой усталости с прочностью и пластичностью материала при статическом разрыве образца. При этом принимают следующие значения коэффициентов уравнений кривой малоцикловой усталости:

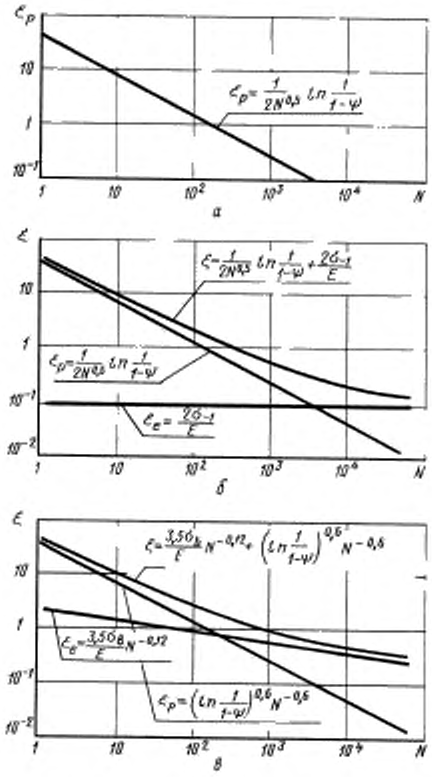
$$\overline{C} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \Psi_n} \text{ или } \overline{C} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \Psi};$$

$$\overline{B} = \frac{3,5\sigma_n}{E}; \ \overline{D} = \ln \frac{1}{1 - \Psi_n} \text{ или } \overline{D} = \ln \frac{1}{1 - \Psi}.$$

Показатель $\mu$ для широкого круга конструкционных сталей и сплавов, в первом приближении, равен 0,5—0,6.

Графики, соответствующие уравнениям (65) — (67) с учетом величин коэффициентов, приведены на черт. 3. Там же даны линии, характеризующие первое и второе слагаемые уравнений (66), (67).

**Зависимость долговечности от величины пластической (*а*) и упругопластической деформации (*б*, *в*) в цикле при** $\varepsilon(k) = \text{const}$




Черт. 3

5.6.4. Для получения расчетных кривых используют, с целью обеспечения запасов прочности, минимально гарантированные по техническим условиям на материал величины $\Psi$, $\sigma_в$, $\sigma_{-1}$. При наличии статистических данных в расчет вводят характеристики, соответствующие средним за вычетом трех стандартных отклонений.

5.6.5. В области числа циклов нагружения до разрушения $10^4$ циклов асимметрию деформаций при определении расчетных кривых малоцикловой усталости не учитывают, если $e_{max} < 0{,}25\varepsilon_f$.

При $e_{max} > 0{,}25\varepsilon_f$, в уравнениях кривых малоцикловой усталости используют коэффициенты, равные $\overline{C} - e_{max}$ и $\overline{D} - e_{max}$.

При числе циклов нагружения в диапазоне $10^4$—$10^5$ асимметрию цикла нагружения учитывают способом, аналогичным применяемому в многоцикловой области.

5.6.6. Масштабный эффект, влияние чистоты поверхности, коррозии и т. п. следует оценивать постановкой соответствующих экспериментов.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1*
*Обязательное*

## ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СТАНДАРТЕ

$\sigma_{-1}$ — предел выносливости при симметричном цикле гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм при изгибе с вращением, изготовленных по ГОСТ 25.502, МПа.

$\overline{\sigma}_{-1}$ — медианное значение $\sigma_{-1}$ для образцов из металла одной плавки, МПа.

$\overline{\overline{\sigma}}_{-1}$ — медианное значение предела выносливости на совокупности всех плавок металла данной марки гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм, изготовленных из заготовок диаметром $d$, равным абсолютному размеру рассчитываемой детали, МПа.

$K$ — коэффициент снижения предела выносливости.

$\sigma_{-1д}$ — предел выносливости детали при симметричном цикле, выраженный в номинальных напряжениях, МПа.

$\overline{\sigma}_{-1д}$ — медианное значение $\sigma_{-1д}$, МПа.

$\overline{\overline{\sigma}}_{-1д}$ — медианное значение предела выносливости детали на совокупности всех плавок металла данной марки, МПа.

$(\sigma_{-1})_P$ — значение $\sigma_{-1}$, соответствующее вероятности разрушения $P$ %, например $(\sigma_{-1})_{10}$ при $P =$ = 10 %, МПа.

$(\sigma_{-1д})_P$ — предел выносливости детали, соответствующий вероятности разрушения $P$ %, МПа.

$\overline{\overline{\sigma}}_{-1}'$ — медианное значение предела выносливости гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 =$ = 7,5 мм, изготовленных из заготовок металла данной марки размерами 10—20 мм, МПа.

$K_1$ — коэффициент, учитывающий снижение механических свойств металла ($\sigma_в$, $\sigma_т$, $\sigma_{-1}$) с ростом размеров заготовок.

$\sigma_в$ — временное сопротивление (предел прочности) стали данной марки при растяжении, МПа.

$\overline{\sigma}_в$ — медианное значение предела прочности стали данной марки, определенное на образцах, изготовленных из заготовок диаметром $d$, равным абсолютному размеру рассчитываемой детали, МПа.

$K_\sigma = \sigma_{-1d}/\sigma_{-1д}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений.

$K_{d\sigma} = \sigma_{-1d}/\sigma_{-1}$ — коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения.

$\sigma_{-1d}$ — предел выносливости образца без концентрации напряжений диаметром $d$, МПа.

$K_F = \dfrac{\sigma_{-1F}}{\sigma_{-1}}$ — коэффициент влияния шероховатости поверхности, равный отношению предела выносливости образца с данным качеством поверхности $\sigma_{-1F}$ к пределу выносливости гладкого лабораторного образца.

$K_y = \dfrac{\sigma_{-1д\ упр}}{\sigma_{-1д}}$ — коэффициент влияния поверхностного упрочнения, равный отношению предела выносливости упрочненной детали $\sigma_{-1д\ упр}$ к пределу выносливости неупрочненной детали $\sigma_{-1д}$.

$K_A$ — коэффициент анизотропии.

$K_{кор} = \frac{\sigma_{-1\,кор}}{\sigma_{-1}}$ — коэффициент влияния коррозии, равный отношению предела выносливости гладкого образца в условиях коррозии $\sigma_{-1\,кор}$ к пределу выносливости образца при испытаниях в воздухе.

$\xi'$, $\xi''$ — поправочные коэффициенты.

$\nu_\sigma$ — постоянная для данного металла величина (при определенной температуре и частоте испытания), определяющая чувствительность к концентрации напряжений и влиянию абсолютных размеров поперечного сечения при изгибе или растяжении—сжатии.

$L$ — параметр рабочего сечения образца или детали или его часть, прилегающая к местам повышенной напряженности, мм.

$\bar{G}$ — относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентрации напряжений, $мм^{-1}$.

$\bar{G}_\tau$ — относительный градиент касательного напряжения, $мм^{-1}$.

$L/\bar{G}$ — критерий подобия усталостного разрушения детали, $мм^2$.

$(L/\bar{G})_0$ — критерий подобия усталостного разрушения образца диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм, $мм^2$.

$\Theta = \frac{L/\bar{G}}{(L/\bar{G})_0}$ — относительный критерий подобия усталостного разрушения.

$\alpha_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_н$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений, равный отношению максимального напряжения в зоне концентрации $\sigma_{max}$ к номинальному напряжению $\sigma_н$, вычисленному по формулам сопротивления материалов (в предположении упругого распределения напряжений).

$n = f(\bar{G}, \sigma_т)$ — коэффициент, зависящий от значений относительного градиента напряжений и предела текучести.

$\sigma_т$ — предел текучести стали данной марки при растяжении, МПа.

$q$ — коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений.

$\sigma_{-1}^{(P)}$ — предел выносливости образцов при растяжении—сжатии, МПа.

$A$, $B$, $C$, $Z$ — постоянные коэффициенты.

$v_{\sigma_{-1д}}$ — коэффициент вариации пределов выносливости деталей.

$z_P$ — квантиль нормального распределения, соответствующая заданной вероятности разрушения $P$.

$s_{\sigma_{-1д}}$ — среднее квадратическое отклонение предела выносливости детали, МПа.

$v_{\sigma_{max}}$ — коэффициент вариации максимальных разрушающих напряжений в зоне концентрации.

$v_{\bar{\sigma}_{-1}}$ — коэффициент вариации средних значений пределов выносливости образцов.

$v_{\alpha_\sigma}$ — коэффициент вариации теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma$.

$m$ — показатель наклона левой ветви кривой усталости в двойных логарифмических координатах.

$N_G$ — абсцисса точки перелома кривой усталости.

$\Psi_\sigma$ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений.

$\Psi_{\sigma_д}$ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений для детали.

$\sigma_{а.д}$ — предельная амплитуда для детали при асимметричном цикле нагружения.

$d_0$, $d$, $d_р$, $D$, $\rho$, $t$, $a$, $h$, $H$ — размеры рабочего сечения образцов (деталей), мм.

$\varepsilon_f$ — располагаемая пластичность материала, %.

$N$ — число циклов нагружения.

$k$ — число полуциклов нагружения ($k = 0, 1, 2, 3 \ldots$).

$\sigma_{max}^{(0)}$ — действительное максимальное напряжение в исходном нагружении (нулевой полуцикл), МПа.

$\sigma_н$ — номинальное напряжение, МПа.

$K_\sigma^{(0)} = \frac{\sigma_{max}^{(0)}}{\sigma_н}$ — коэффициент концентрации напряжений в упругопластической области в исходном нагружении (нулевой полуцикл).

$e_{max}^{(0)}$ — действительная максимальная упругопластическая деформация в исходном нагружении (нулевой полуцикл), %.

$e_н$ — номинальная деформация в исходном нагружении (нулевой полуцикл), %.

$K_e^{(0)} = \frac{e_{max}^{(0)}}{e_н}$ — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области в исходном нагружении (нулевой полуцикл).

$S^{(k)}_{max}$ — действительное максимальное напряжение в $k$-м полуцикле нагружения, МПа.

$S_н$ — номинальное напряжение в $k$-м полуцикле нагружения, МПа.

$K^{(k)}_S = \frac{S^{(k)}_{max}}{S_н}$ — коэффициент концентрации напряжений в упругопластической области в $k$-м полуцикле нагружения.

$\varepsilon^{(k)}_{max}$ — действительная максимальная упругопластическая деформация в $k$-м полуцикле нагружения, %.

$\varepsilon_н$ — номинальная деформация в $k$-м полуцикле нагружения, %.

$K^{(k)}_\varepsilon = \frac{\varepsilon^{(k)}_{max}}{\varepsilon_н}$ — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области в $k$-м полуцикле нагружения.

$e^{(0)}$ — уровень деформации в исходном нагружении гладких образцов, %.

$\sigma^{(0)}$ — уровень напряжений в исходном нагружении гладких образцов, МПа.

$\sigma^{(0)}_{пц}$ — предел пропорциональности в исходном нагружении, определенный при допуске на пластическую деформацию 0,02 % в координатах $\sigma - e$, МПа.

$e^{(0)}_{пц}$ — деформация, соответствующая пределу пропорциональности в исходном нагружении в координатах $\sigma - e$, %.

$S^{(k)}_{пц}$ — предел пропорциональности в $k$-м полуцикле нагружения в координатах $S-$ ε, МПа.

$\varepsilon^{(k)}_{пц}$ — деформация, соответствующая пределу пропорциональности в $k$-м полуцикле нагружения в координатах $S - \varepsilon$, %.

$E^{(0)}_т$ — показатель упрочнения в упругопластической области при линейной аппроксимации диаграммы статического деформирования.

$E^{(k)}_т$ — показатель упрочнения в упругопластической области при линейной аппроксимации диаграммы циклического деформирования в $k$-м полуцикле нагружения.

$m^{(0)}$ — показатель упрочнения в упругопластической области при степенной аппроксимации диаграммы статического деформирования.

$m^{(k)}$ — показатель упрочнения в упругопластической области при степенной аппроксимации диаграммы циклического деформирования в $k$-м полуцикле нагружения.

$\delta^{(1)}$ — ширина петли гистерезиса в 1-м полуцикле нагружения, %.

$\delta^{(k)}$ — ширина петли гистерезиса в $k$-м полуцикле нагружения, %.

$e^{(k)}$ — упругопластическая деформация, накопленная после $k$-го полуцикла нагружения, %.

$e^{(k)}_p$ — пластическая деформация, накопленная после $k$-го полуцикла нагружения, %.

$e^{(k)}_{max}$ — максимальная упругопластическая деформация, накопленная за $k$ полуциклов нагружения, %.

$\varepsilon^{(k)} = \varepsilon^{(k)}_p + \varepsilon^{(k)}_e$ — размах упругопластической деформации в $k$-м полуцикле нагружения, %.

$\varepsilon^{(k)}_p$ — размах пластической деформации в $k$-м полуцикле нагружения, равный $\sigma^{(k)}$.

$\varepsilon^{(k)}_e$ — упругая деформация в $k$-м полуцикле нагружения, %, равная $S^{(k)}/E$.

$\Psi$ — относительное сужение площади поперечного сечения образца при статическом растяжении, %.

$\Psi_в$ — относительное сужение площади поперечного сечения образца, соответствующее $\sigma_в$, %.

$E$ — модуль упругости материала, МПа.

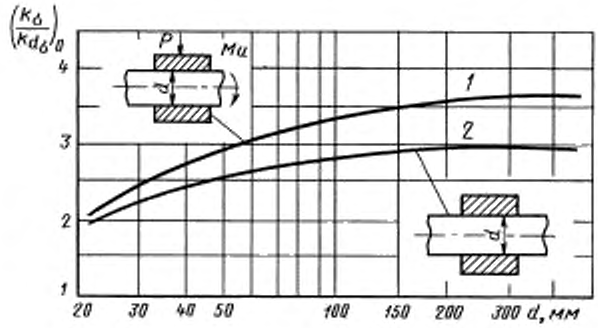
$C, B, D$ — коэффициенты уравнений кривой малоцикловой усталости.

Примечание. При кручении обозначения аналогичны с заменой σ на τ, например $\tau_{-1}$, $\tau_{-1д}$ и т. д.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 2*
*Обязательное*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ $K_\sigma$, $K_\tau$, ОТНОШЕНИЙ $\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}}$, $\frac{K_\tau}{K_{d\tau}}$, КОЭФФИЦИЕНТОВ $n$, $q$, $K_1$ И $K_3$

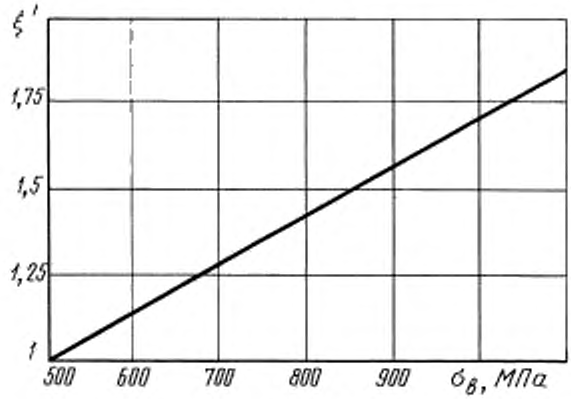
### Валы с напрессованными деталями при изгибе




$\sigma_a$ = 500 МПа; $P \geq 30$ МПа; *1* — через напрессованную деталь передается сила или момент; *2* — через напрессованную деталь не передается усилий

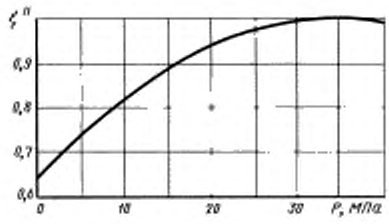
Черт. 1

### Поправочный коэффициент $\xi'$ на предел прочности $\sigma_a$ (к черт. 1)



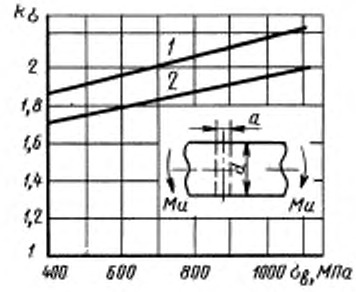

Черт. 2

**Поправочный коэффициент $\xi''$ на давление напрессовки P (к черт. 1)**




Черт. 3

**Валы с поперечным отверстием при изгибе**



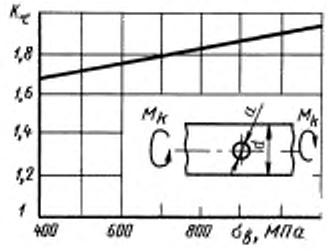

1 — $\frac{a}{d}$ = 0,05—0,10; 2 — $\frac{a}{d}$ = 0,15—0,25,

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{W_{\text{нетто}}}$$

при $d$ = 30—50 мм

Черт. 4

**Валы с поперечным отверстием при кручении**

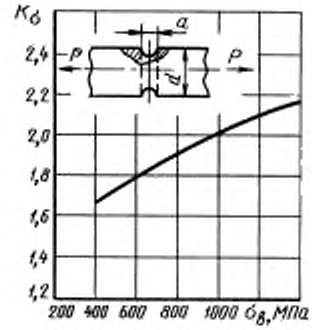



$\frac{a}{d}$ = 0,05—0,25; $\tau_{н} = \frac{M_{к}}{W_{к\ \text{нетто}}}$

при $d$ = 30—50 мм

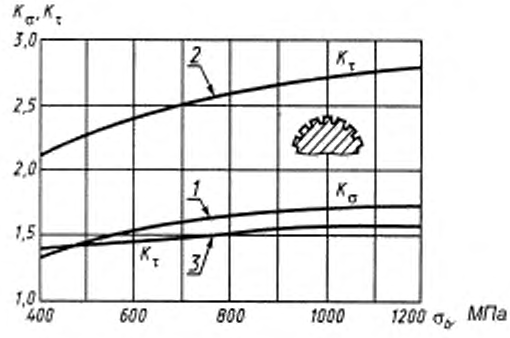
Черт. 5

**Валы с поперечным отверстием при растяжении—сжатии**




$\frac{a}{d}$ = 0,20—0,45; $d$ = 15 мм; $\sigma_{н} = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4} - a\ d}$

Черт. 6

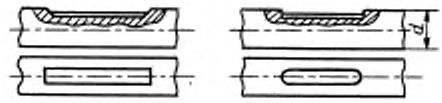


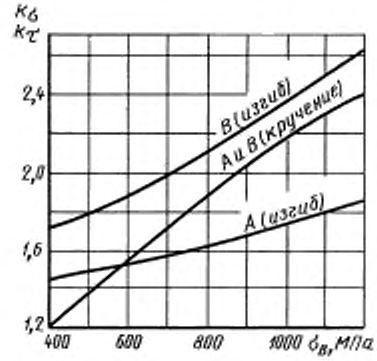

*1* — прямобочные и эвольвентные шлицы; *2* — прямобочные шлицы; *3* — эвольвентные шлицы

Черт. 7

**Валы с *V*-образной кольцевой выточкой**
**Коэффициенты $K_\sigma$, $K_\tau$ для валов со шпоночными пазами типов А и В**

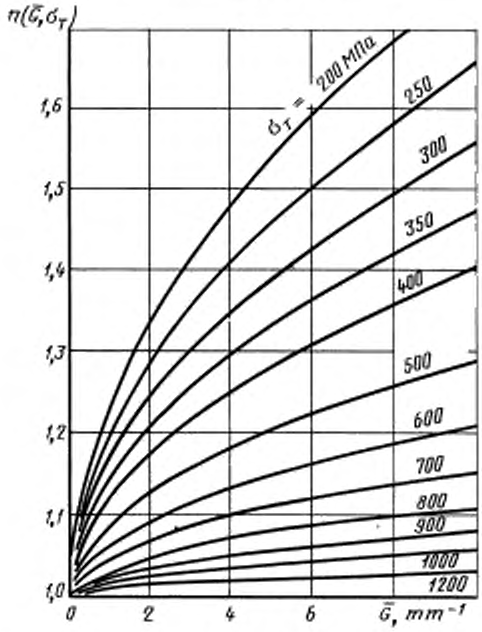
**Тип А** **Тип В**



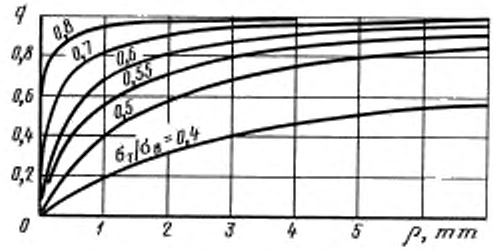

Черт. 13*

**Коэффициенты *n***




Черт. 14

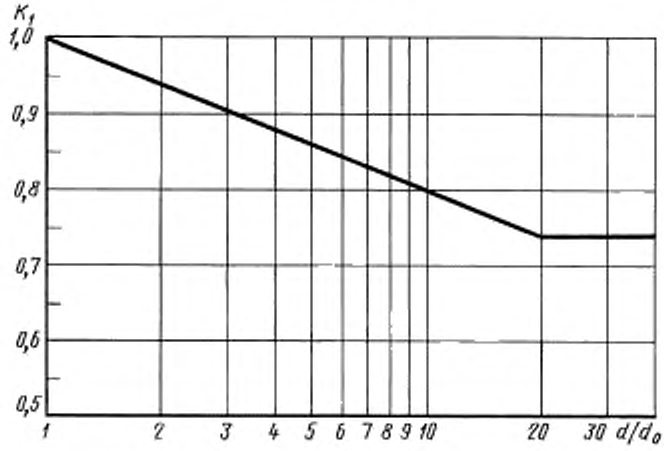
**Коэффициенты *q***




Черт. 15

* Черт. 8—12. **(Исключены, Изм. № 1)**

**Коэффициенты $K_1$**

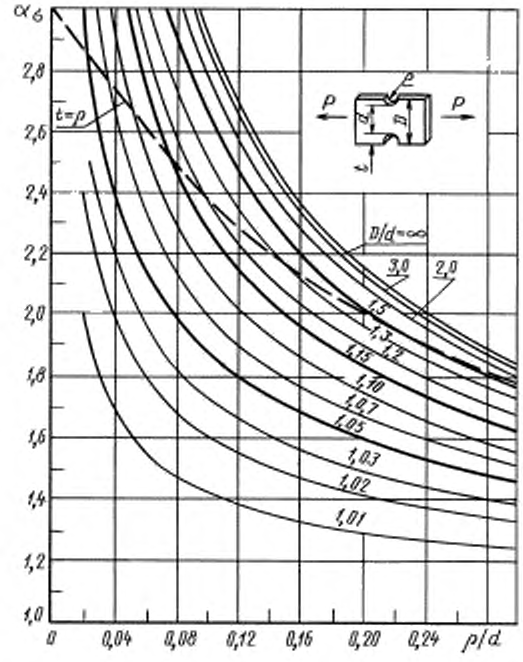



Черт. 16

*ПРИЛОЖЕНИЕ 3*
*Обязательное*

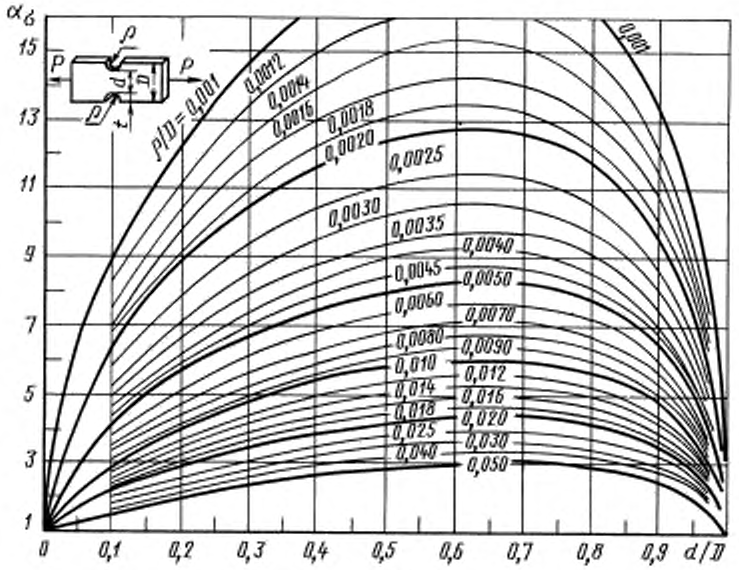
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ $\alpha_\sigma$, $\alpha_\tau$

**Пластины с двухсторонним надрезом при растяжении (черт. 1—3)**



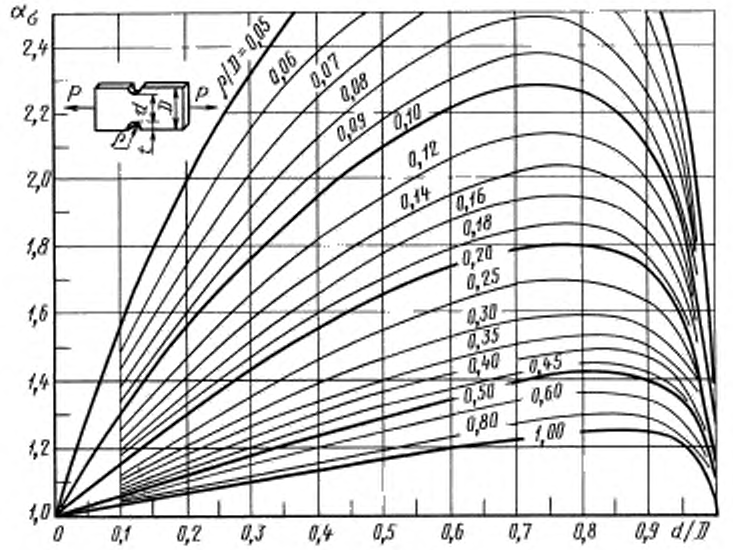

Пунктирная линия $t = \rho$ — полуокружность; $\frac{\rho}{d} = 0{,}02—0{,}30$

Черт. 1




$0{,}001 \le \rho/D \le 0{,}050$

Черт. 2




$0{,}05 \le \rho/D \le 1{,}00$

Черт. 3

**Формулы к черт. 1—3**

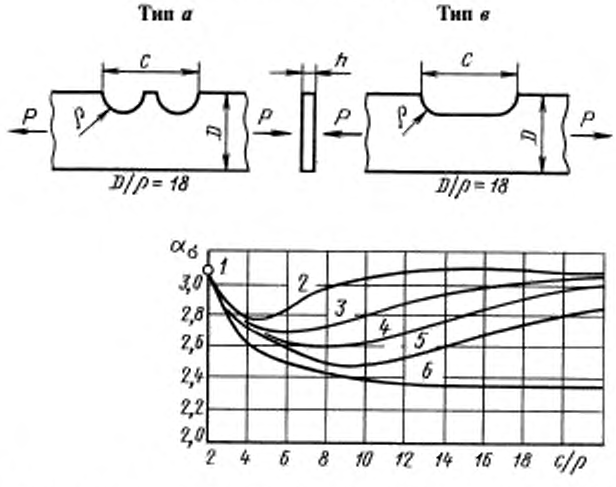
$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{(\alpha_{f\sigma} - 1)(\alpha_{t\sigma} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{f\sigma} - 1)^2 + (\alpha_{t\sigma} - 1)^2}},$$

где $\alpha_{f\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}}$;

$$\alpha_{t\sigma} = \frac{2\left(\frac{a}{\rho}+1\right)\sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left(\frac{a}{\rho}+1\right)\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{a}{\rho}}+\sqrt{\frac{a}{\rho}}}$$

$$a = \frac{d}{2}.$$

**Пластины типов *а* и *в* при растяжении**

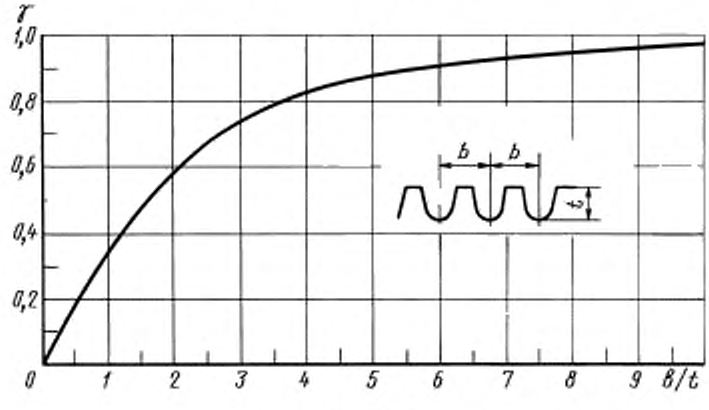



*1—5* — пластины типа *а* (*1* — однократный надрез; *2* — двухкратный надрез; *3* — трехкратный надрез; *4* — четырехкратный надрез; *5* — пятикратный надрез); *6* — пластины типа *в*

$$\sigma_н = \frac{P}{h(D-\rho)}$$

Черт. 4

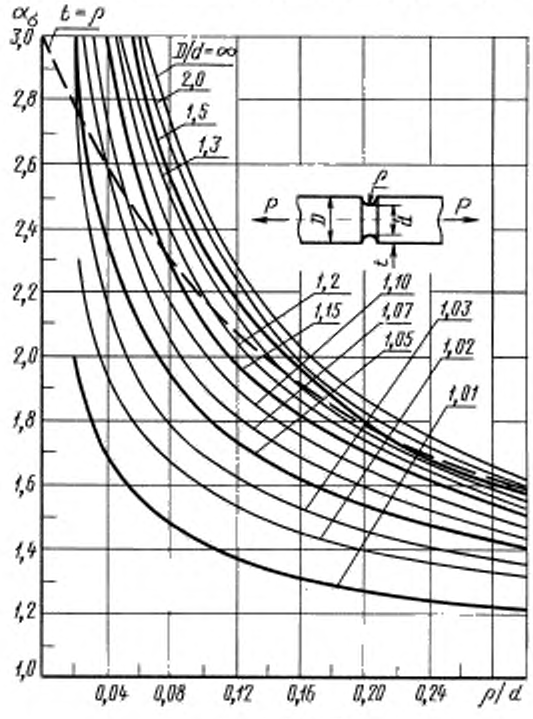
**Коэффициент разгрузки γ**




Черт. 5

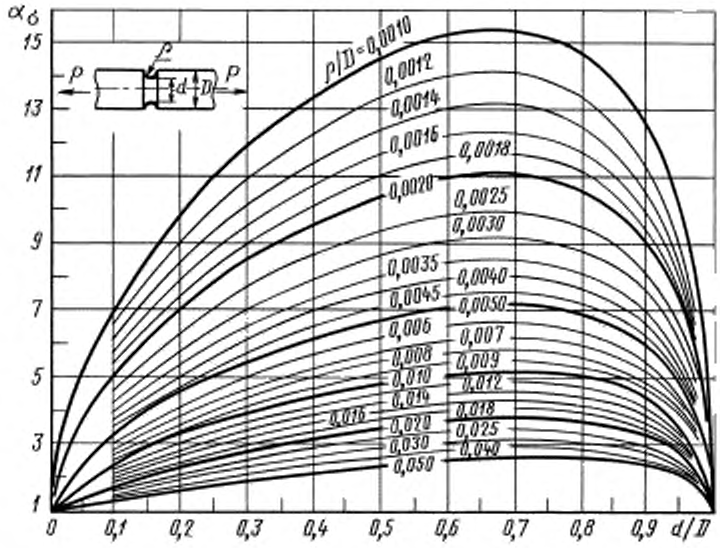
Примечание. Коэффициент $\gamma$ для многократного надреза находят по диаграммам для однократного надреза при глубине $t' = \gamma \cdot t$, где $t$ — глубина многократного надреза, $t'$ — глубина эквивалентного однократного надреза.

**Валы с выточкой при растяжении (черт. 6—8)**



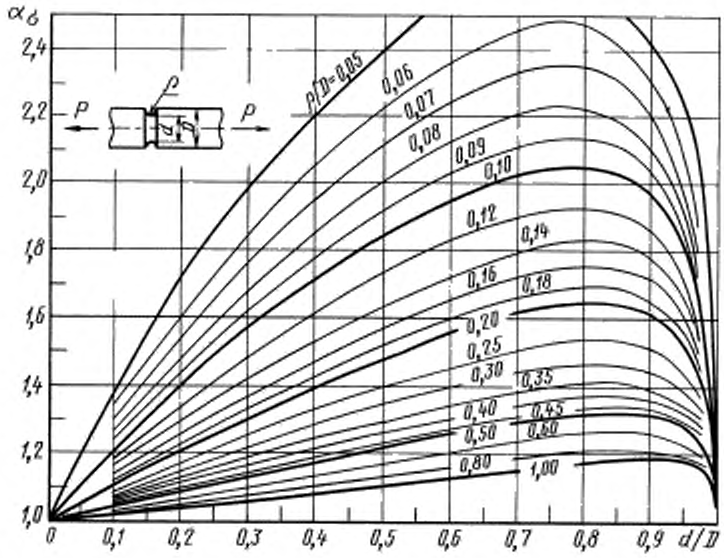

$\rho/d = 0{,}02—0{,}30$

Черт. 6




$0{,}001 \le \rho/D \le 0{,}050$

Черт. 7




$0{,}050 \le \rho/D \le 1{,}00$

Черт. 8

**Формулы к черт. 6—8**

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{(\alpha_{f\sigma} - 1)(\alpha_{t\sigma} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{f\sigma} - 1)^2 + (\alpha_{t\sigma} - 1)^2}},$$

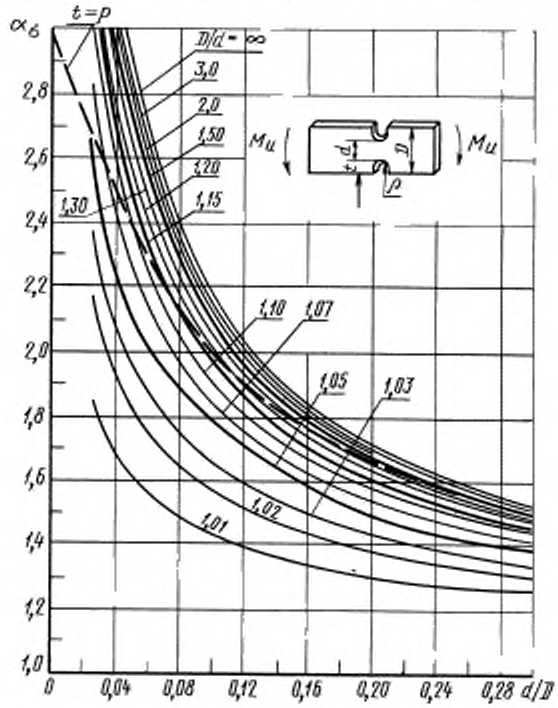
где $\alpha_{f\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}}$,

$$\alpha_{t\sigma} = \frac{1}{2N}\left(\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 1\right)\left[2\left(\frac{a}{\rho} + 1\right) - \left(1 - \frac{2}{m}\right)\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 1\right],$$

$$N = \frac{a}{\rho} + \frac{2}{m}\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 2,$$

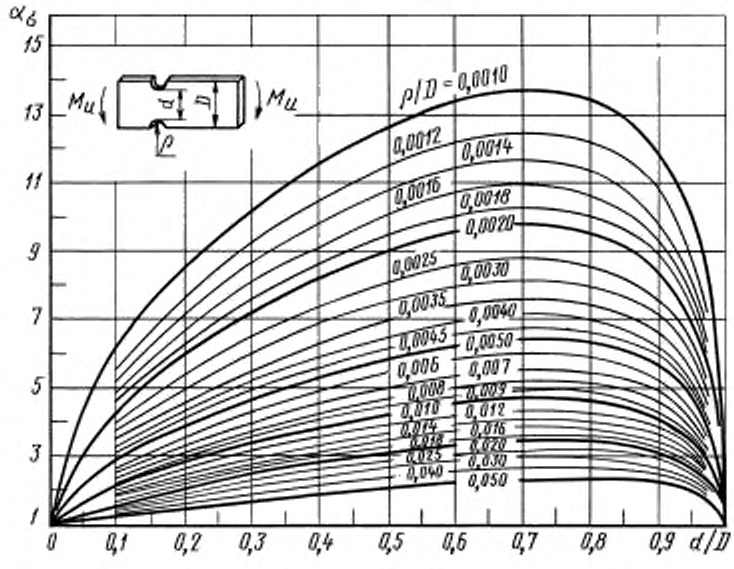
$$a = \frac{d}{2}, \frac{1}{m} = 0{,}3.$$

**Пластины с двусторонним надрезом при изгибе (черт. 9—11)**



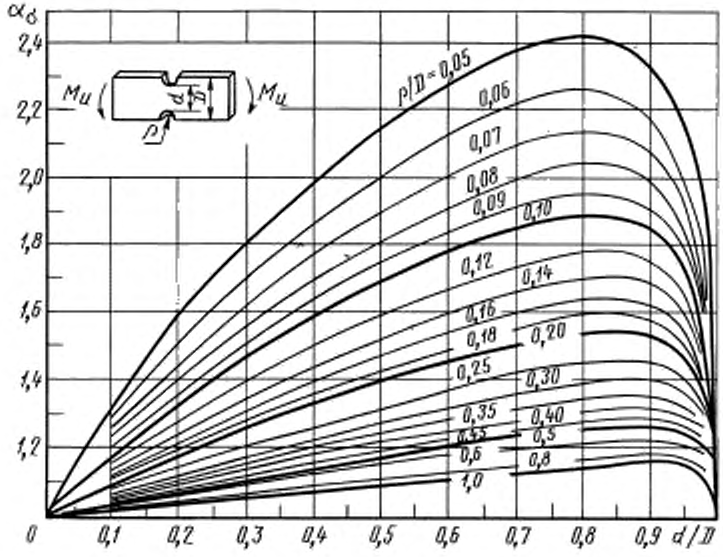

$\rho/d = 0{,}02-0{,}30$

Черт. 9




$0{,}001 \le \rho/D \le 0{,}050$

Черт. 10




$0{,}05 \le \rho / D \le 1{,}00$

Черт. 11

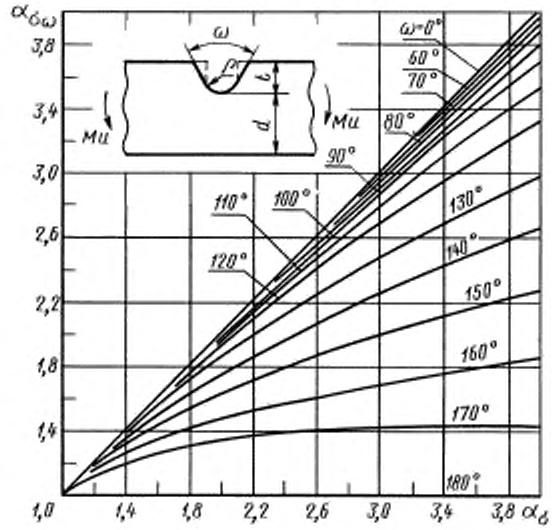
**Формулы к черт. 9—11**

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{(\alpha_{f\sigma} - 1)(\alpha_{t\sigma} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{f\sigma} - 1)^2 + (\alpha_{t\sigma} - 1)^2}},$$

где $\alpha_{f\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}}$,

$$\alpha_{t\sigma} = \frac{4\frac{a}{\rho}\sqrt{\frac{a}{\rho}}}{3\left[\sqrt{\frac{a}{\rho}} + \left(\frac{a}{\rho} - 1\right)\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right]}.$$

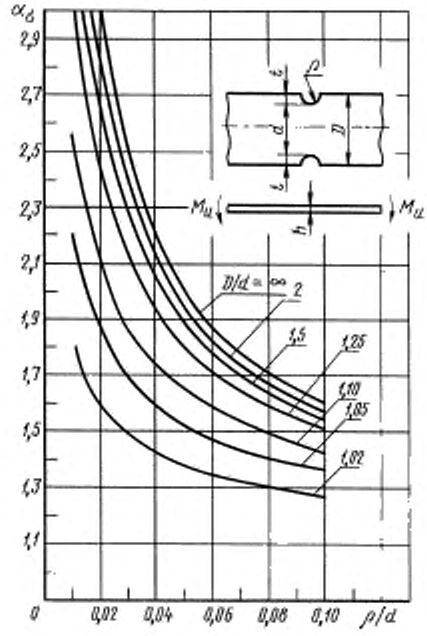
**Влияние угла надреза на коэффициент концентрации напряжений при изгибе пластины с односторонним надрезом**




$\alpha_\sigma$ — коэффициент концентрации напряжений для надреза с углом ω = 0 (пунктир на схеме пластины); $\alpha_{\sigma_\omega}$ — коэффициент концентрации напряжений для надреза с углом ω при тех же размерах

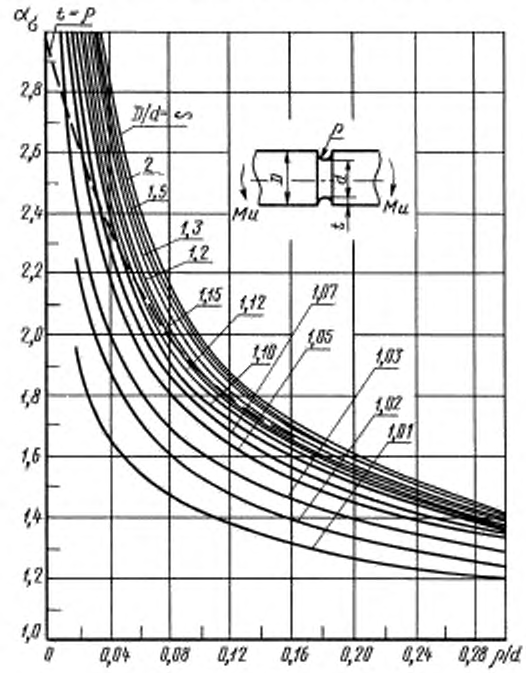
Черт. 12

**Тонкий лист с двухсторонним надрезом при изгибе в плоскости, перпендикулярной плоскости листа (*t/h* значительно)**



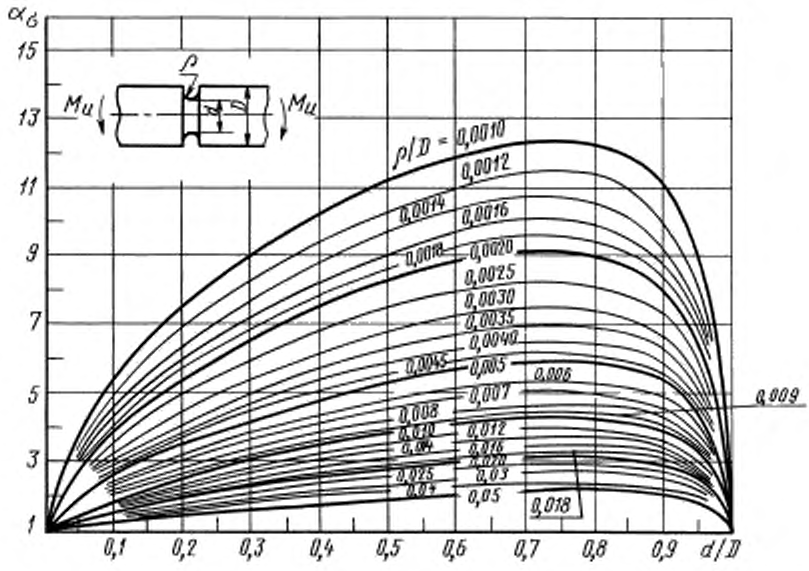

Черт. 13

**Валы с выточкой при изгибе (черт. 14—16)**



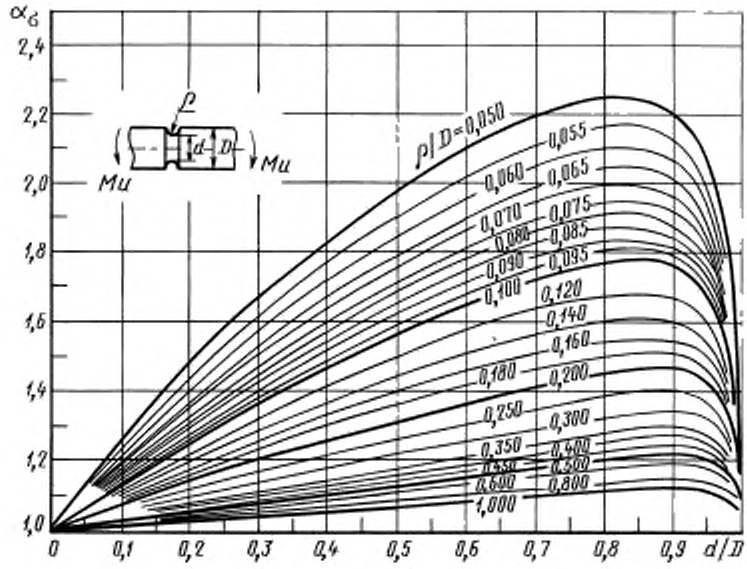

$\rho/d = 0{,}02—0{,}30$

Черт. 14




$0{,}001 \le \rho/D \le 0{,}050$

Черт. 15




$0{,}050 \le \rho/D \le 1{,}00$

Черт. 16

**Формулы к черт. 14—16**

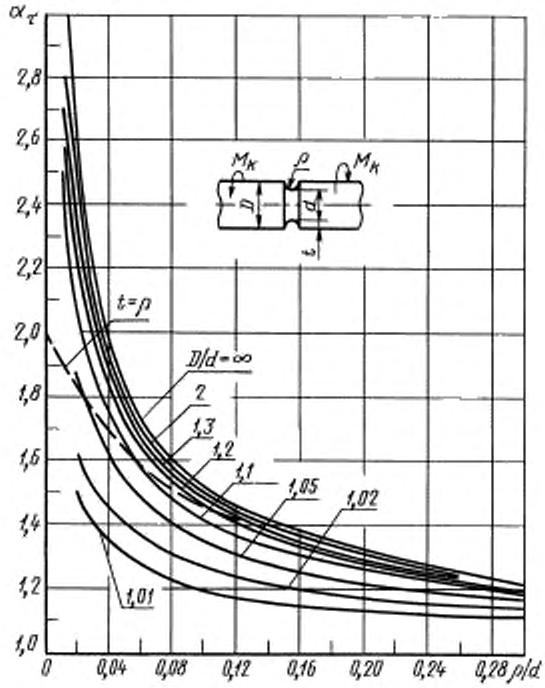
$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{(\alpha_{f\sigma} - 1)(\alpha_{t\sigma} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{f\sigma} - 1)^2 + (\alpha_{t\sigma} - 1)^2}},$$

где $\alpha_{f\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}}$,

$$\alpha_{t\sigma} = \frac{3}{4N}\left(\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 1\right)\left[3\frac{a}{\rho} - \left(1 - \frac{2}{m}\right)\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 4 + \frac{1}{m}\right],$$

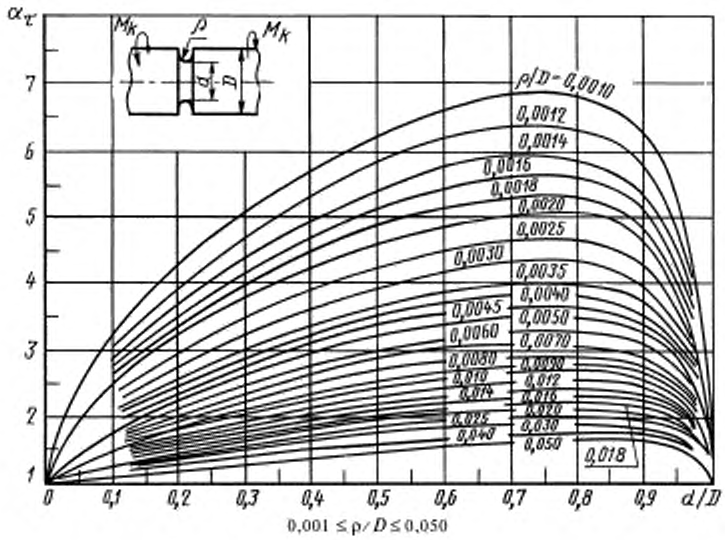
$$N = 3\left(\frac{a}{\rho} + 1\right) + \left(1 + \frac{4}{m}\right)\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + \frac{1 + \frac{1}{m}}{1 + \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1}}.$$

**Валы с выточкой при кручении (черт. 17—19)**



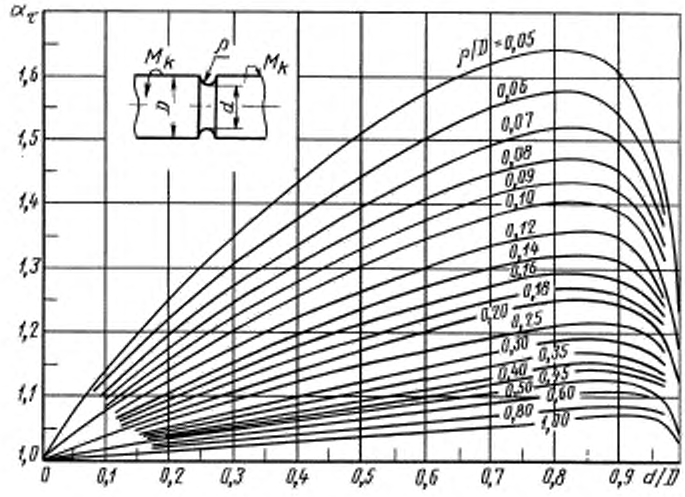

$\rho/d = 0{,}02-0{,}30$

Черт. 17




$0{,}001 \le \rho/D \le 0{,}050$

Черт. 18




$0{,}05 \le \rho / D \le 1{,}00$

Черт. 19

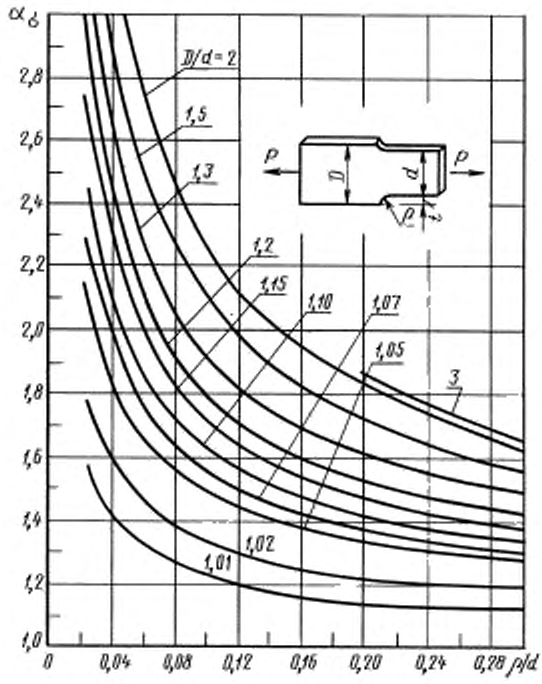
**Формулы к черт. 17—19**

$$\alpha_\tau = 1 + \frac{(\alpha_{f\tau} - 1)(\alpha_{\tau\tau} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{f\tau} - 1)^2 + (\alpha_{\tau\tau} - 1)^2}},$$

где $\alpha_{f\tau} = 1 + \sqrt{\frac{t}{\rho}}$,

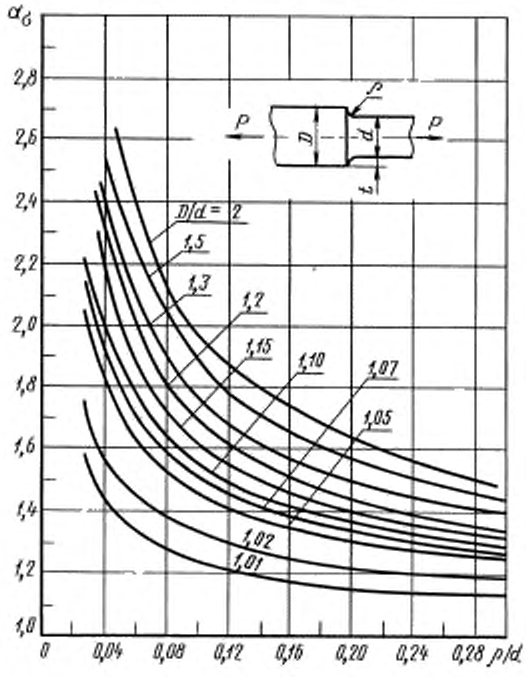
$$\alpha_{\tau\tau} = \frac{3\left(1 + \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1}\right)^2}{4\left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho} + 1}\right)}.$$

**Симметричная ступенчатая пластина с галтелями при растяжении (по данным поляризационно-оптических измерений)**




$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0{,}5}{t/\rho} + 2{,}5\,\frac{(1 + a/\rho)^2}{(a/\rho)^3}}} \quad \text{при } t/\rho > 1$$

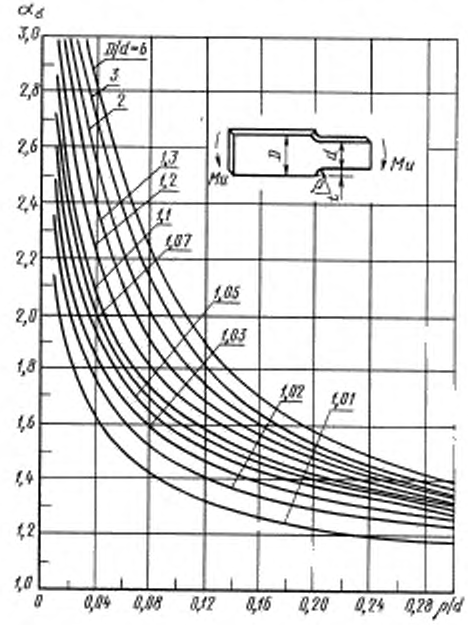
**Ступенчатый вал с галтелью при растяжении (сжатии)**




$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0{,}62}{t/\rho} + 3{,}50\,\frac{(1 + a/\rho)^2}{(a/\rho)^3}}} \quad \text{при } t/\rho > 1$$

Черт. 21

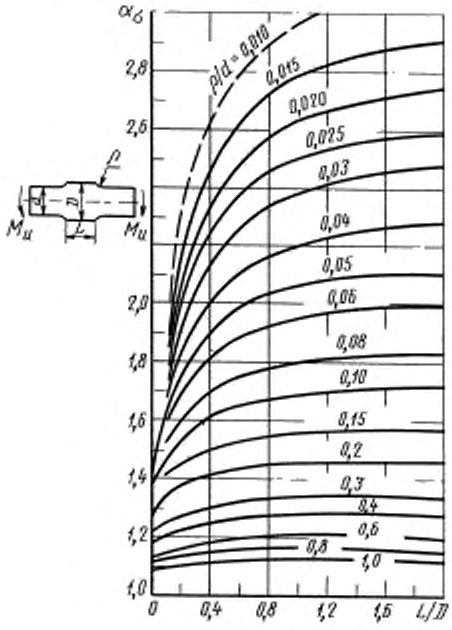
**Ступенчатая пластина с галтелями при изгибе (по данным поляризационно-оптических измерений)**




$$\alpha_n = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0,5}{t/\rho} + 6,0\,\frac{(1 + a/\rho)^2}{(a/\rho)^3}}} \quad \text{при } t/\rho > 1$$

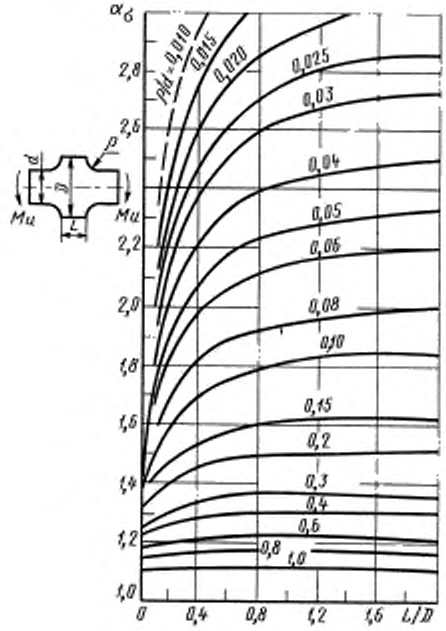
Черт. 22

**Влияние длины выступа пластины на коэффициент концентрации напряжений для ступенчатой пластины с галтелями при изгибе (черт. 23—25)**



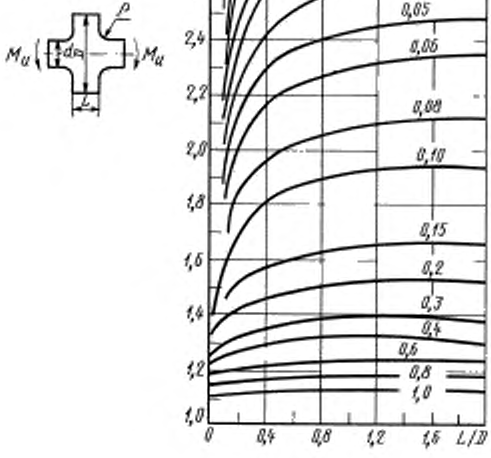

$D/d = 1,25$

Черт. 23




$D/d = 2$

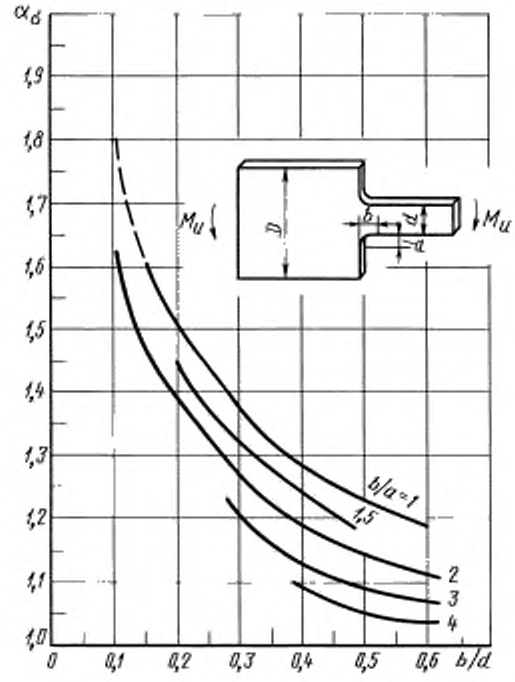
Черт. 24




$D/d = 3$

Черт. 25

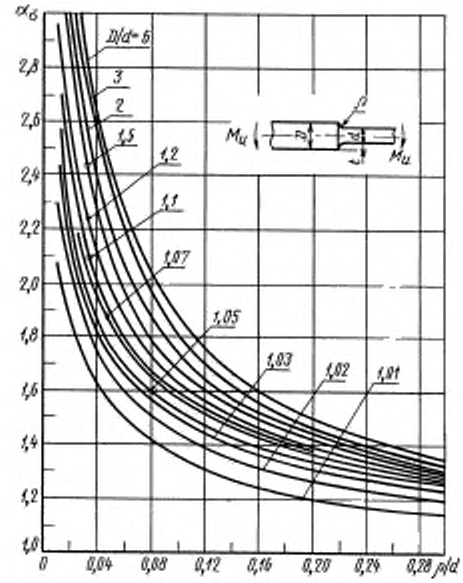
**Ступенчатая пластина с эллиптической галтелью при изгибе**




$D/d = 3$ (по данным поляризационно-оптических измерений)

Черт. 26

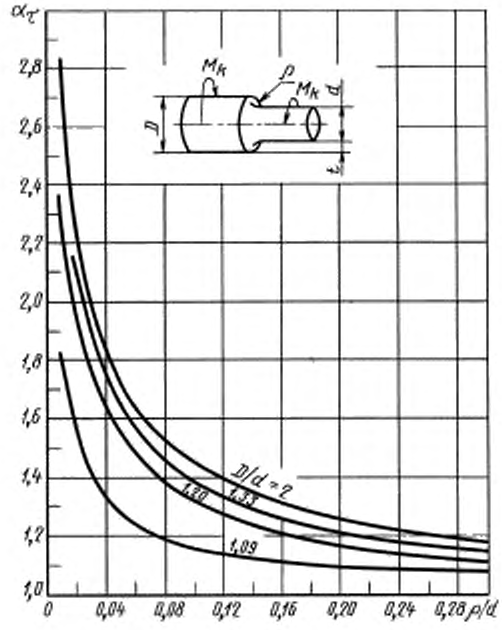
**Ступенчатый вал с галтелью при изгибе**




$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{0{,}62}{t/\rho} + 5{,}80\frac{(1+a/\rho)^2}{(a/\rho)^3} + \frac{0{,}2}{(t/\rho)^3}\cdot\frac{a/\rho}{a/\rho + t/\rho}}}$$

Черт. 27

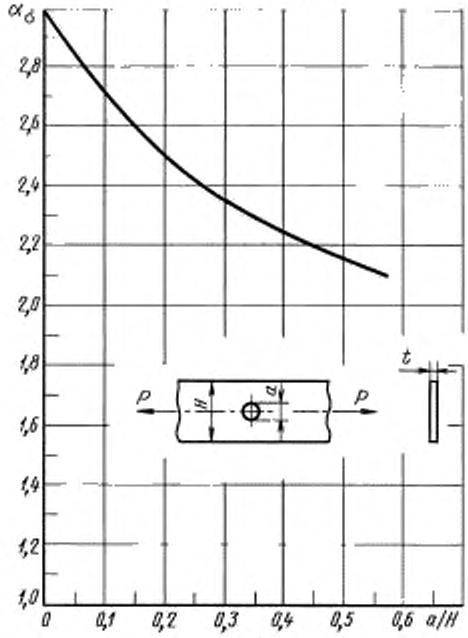
**Ступенчатый вал с галтелью при кручении (измерения по методу электрических аналогий)**




$$\alpha_\tau = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{3,4}{t/\rho} + 19,0\frac{(1+a/\rho)^2}{(a/\rho)^3} + \frac{1,0}{(t/\rho)^2}\,\frac{a/\rho}{a/\rho + t/\rho}}}$$

Черт. 28

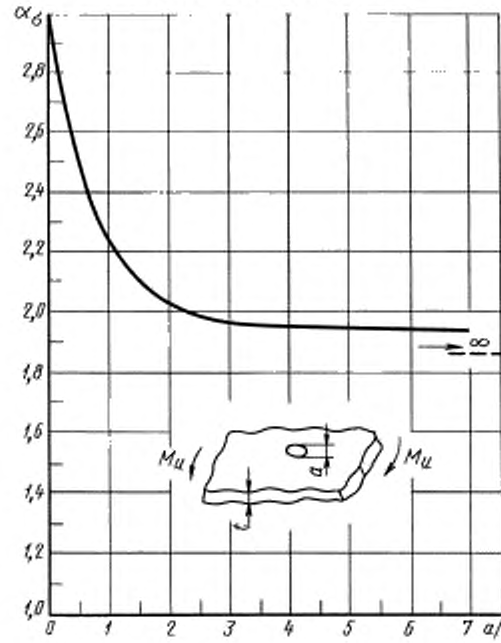
**Тонкая пластина ограниченной ширины с поперечным отверстием при растяжении (теоретическое решение)**




$$\sigma_н = \frac{P}{(H-a)t}$$

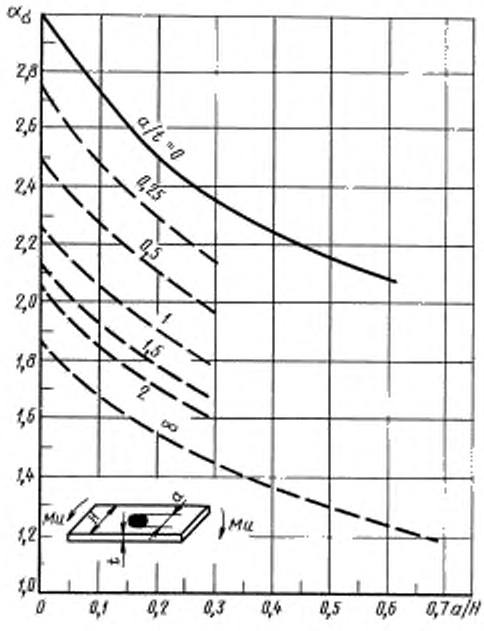
Черт. 29

**Тонкая пластина неограниченной ширины с поперечным отверстием при изгибе (теоретическое решение)**




Черт. 30

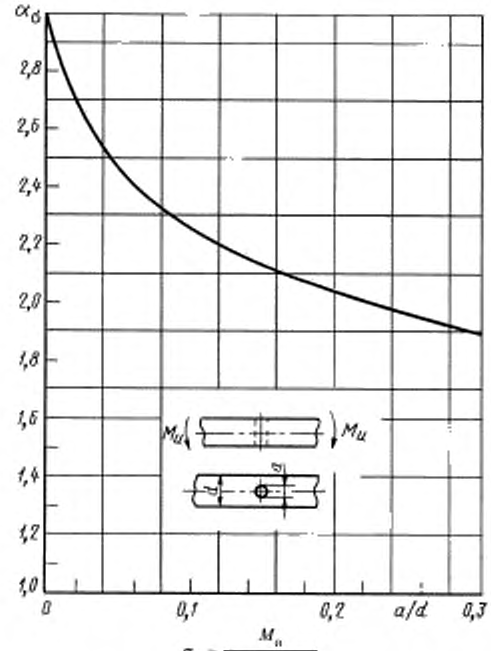
**Тонкая пластина ограниченной ширины с поперечным отверстием при изгибе**




$$\sigma_н = \frac{6M_и}{(H - a)\,t^2}$$

Черт. 31

**Вал с поперечным отверстием при изгибе (измерения с помощью тензометров)**

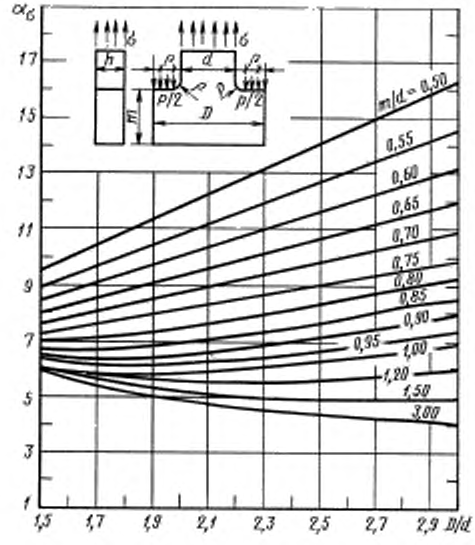



$$\sigma_н = \frac{M_и}{\frac{\pi d^3}{32} - \frac{ad^2}{6}}$$

Черт. 32

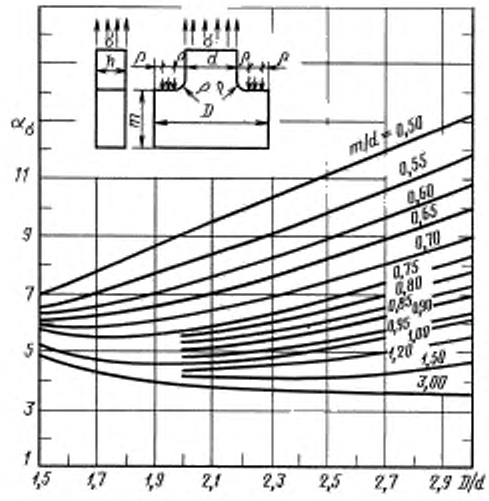
**Пластины с Т-образной головкой**

$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$; $\sigma = \frac{P}{hd}$ (черт. 33—37)



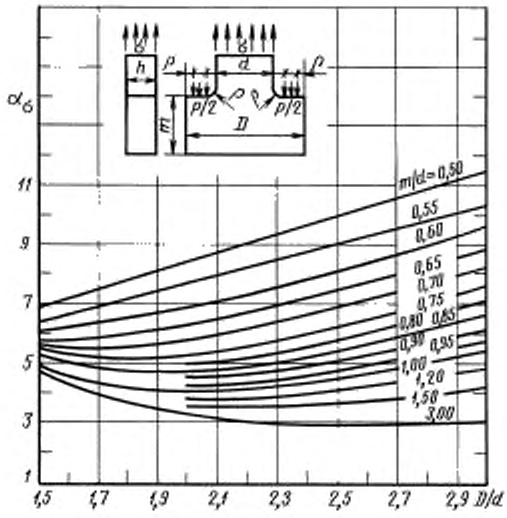

$\rho/d = 0{,}050$ (измерения с помощью поляризационно-оптического метода)

Черт. 33



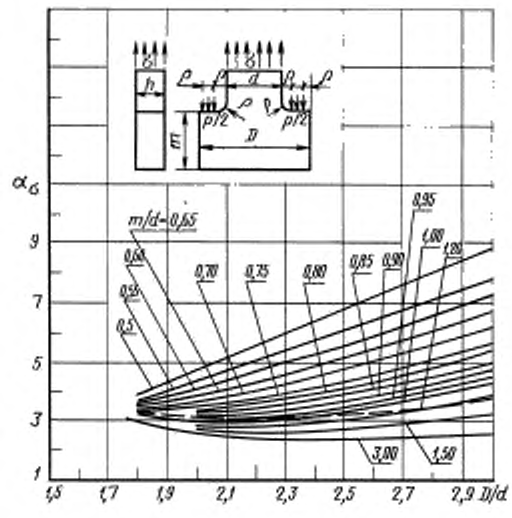

$\rho/d = 0{,}075$

Черт. 34



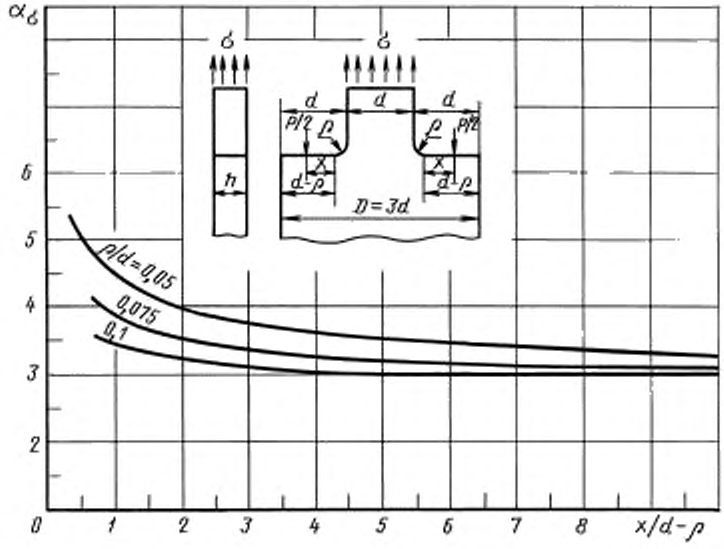

$\rho/d = 0{,}1$

Черт. 35




$\rho/d = 0{,}2$

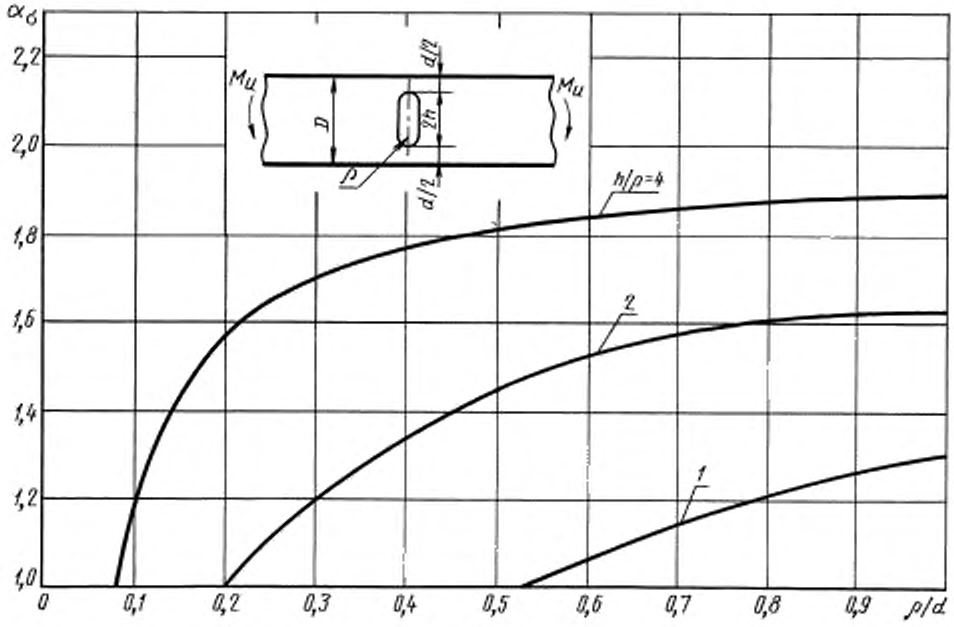
Черт. 36




Примечание. Координата точки приложения сосредоточенной силы $P/2$ по оси $X$-переменная

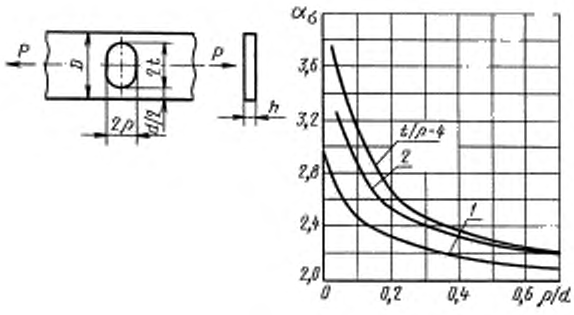
Черт. 37

**Пластина с поперечной прорезью при изгибе**




Черт. 38

**Пластина с поперечной прорезью при растяжении**

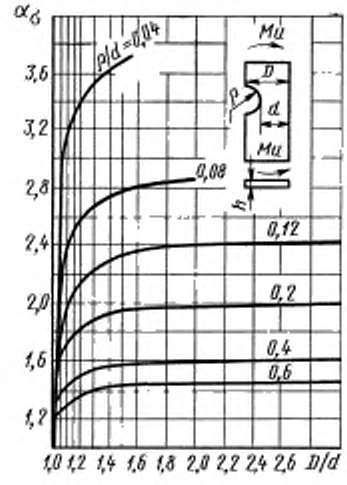



$$\sigma_н = \frac{P}{h\,(D - 2\,t)}.$$

$\alpha_\sigma = 2$ при $\rho/d \to \infty$.

Черт. 39

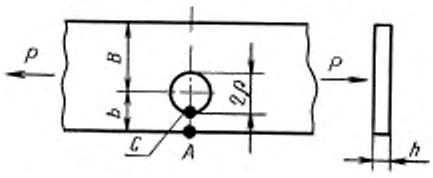
**Пластина с односторонним надрезом при изгибе**

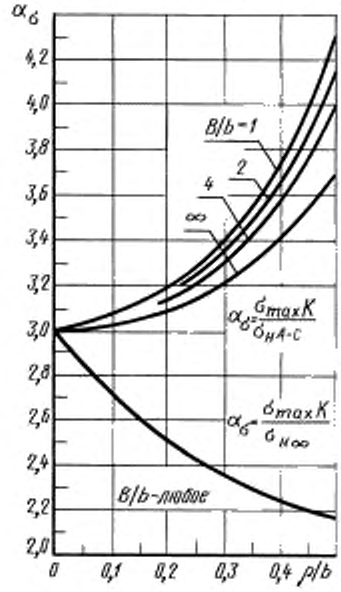



$$\sigma_н = \frac{M_н}{(1/6)\,d^2\,h}.$$

Черт. 40

**Пластина с эксцентрично расположенным отверстием толщиной *h* при растяжении**



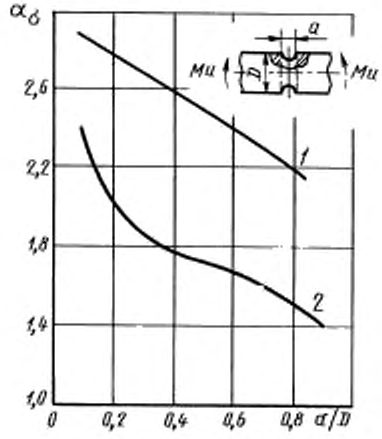




$$\sigma_{н-} = \frac{P}{h(B + b)}.$$

$$\sigma_{н\,A-C} = \sigma_н = \frac{\sqrt{1 - (\rho/b)^2}}{\left(1 - \frac{\rho}{b}\right)\left[1 - \frac{b}{B}\left(1 - \sqrt{1 - (\rho/b)^2}\right)\right]}.$$

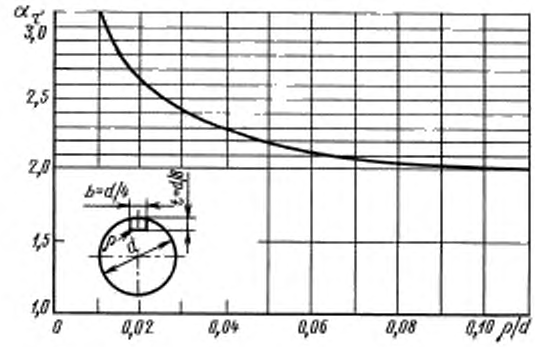
Черт. 41

**Вал с поперечным отверстием при растяжении (1) и изгибе (2)**



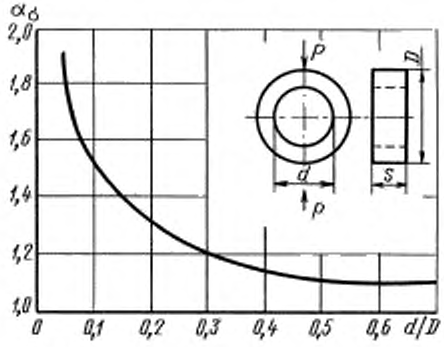

Черт. 42

**Вал с пазом для призматической шпонки при кручении**




Черт. 43

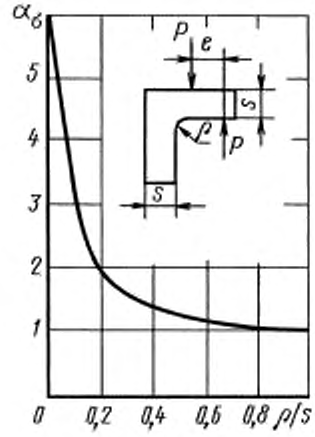
**Кольцо с наружной единичной нагрузкой *P***




$$\sigma_н = \frac{6P(D+d)}{\pi S(D-d)^2}$$

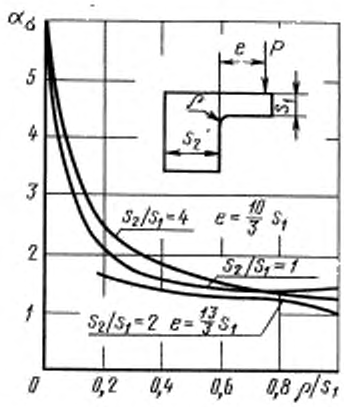
Черт. 44

**Уголок с равными по толщине полками при изгибающем моменте $P \cdot e$**



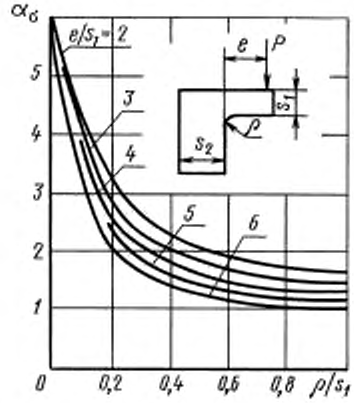

Черт. 45

**Уголок с неравными по толщине полками при изгибе от единичной нагрузки *P***



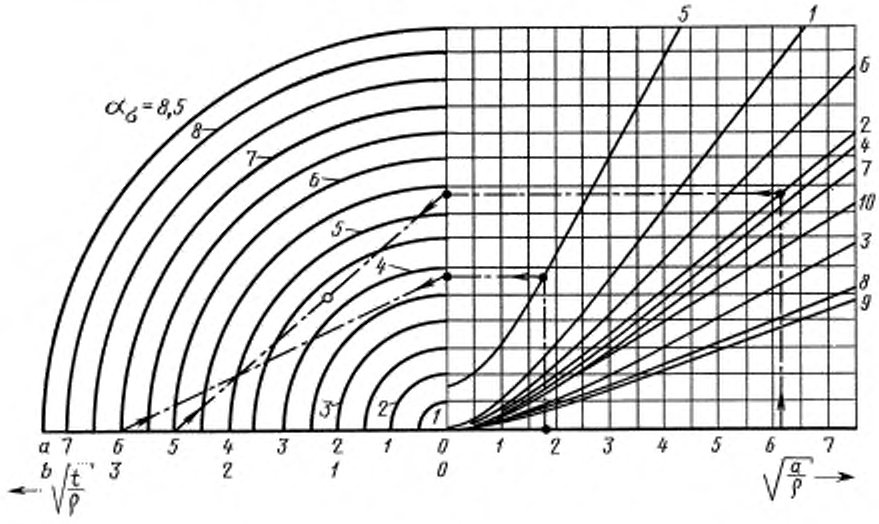

Черт. 46

**Уголок с приблизительно равными по толщине полками при изгибе от единичной нагрузки *P***



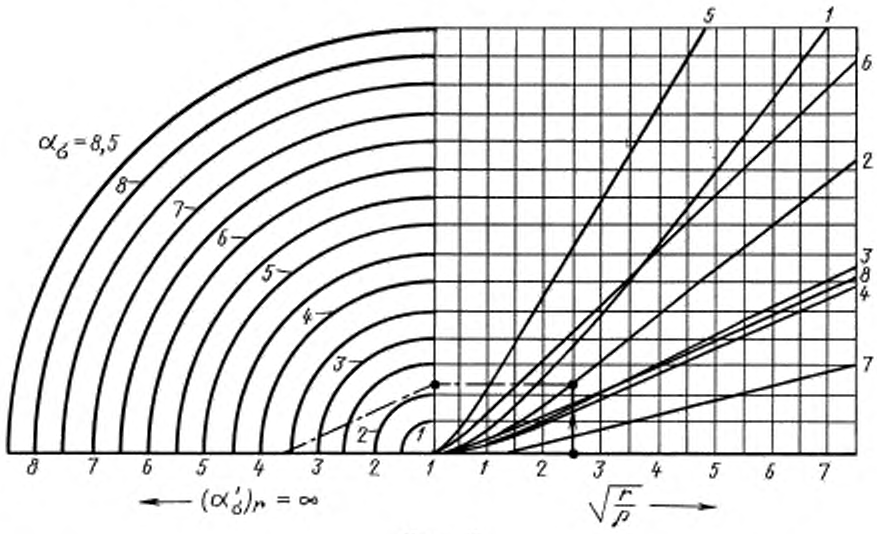

Черт. 47

**Номограмма для определения теоретического коэффициента концентрации**




Черт. 48

**Номограмма для кольцевых выточек с осевым отверстием**



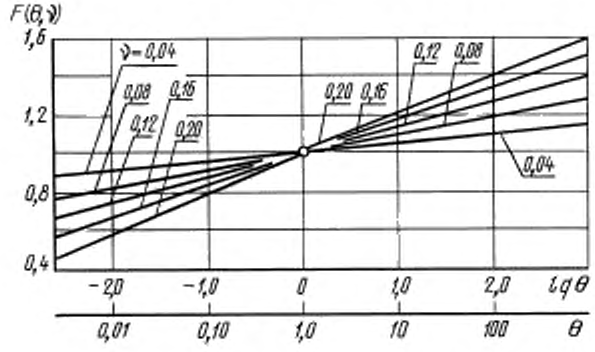

Черт. 49

*ПРИЛОЖЕНИЯ 1—3.* **(Измененная редакция, Изм. № 1).**

*ПРИЛОЖЕНИЕ 4*
*Обязательное*

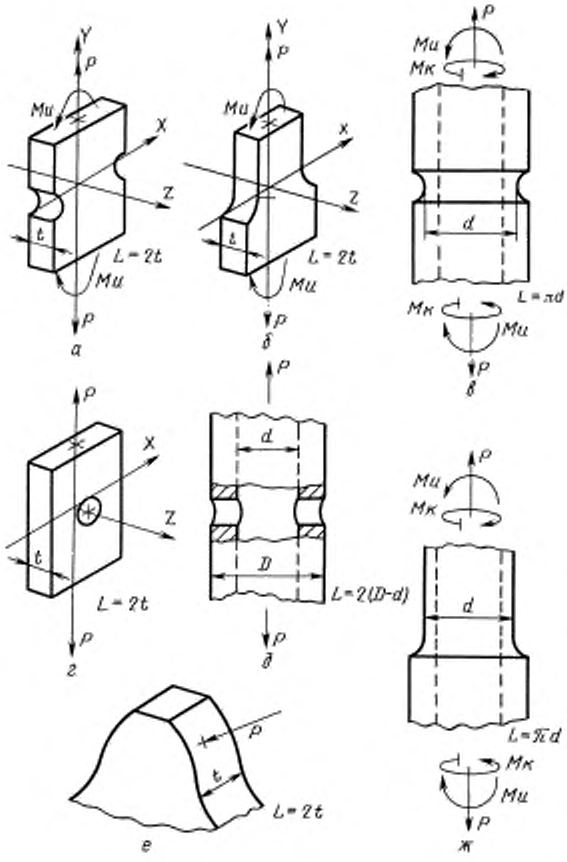
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ $F(\Theta, \nu)$, ПАРАМЕТРА $L$, КОЭФФИЦИЕНТА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ $K_F$ И КОЭФФИЦИЕНТА $K_{кор}$

Значения функции $F(\Theta, \nu)$



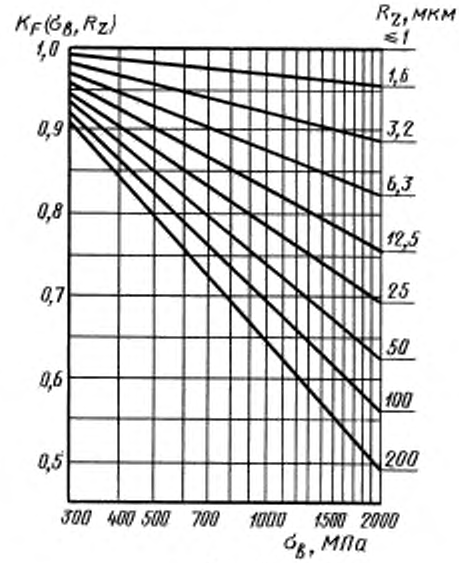

Черт. 1

**Схемы к определению параметра $L$**




Черт. 2

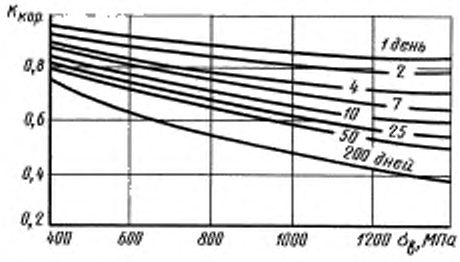
**Значения коэффициентов $K_F$**




Черт. 3

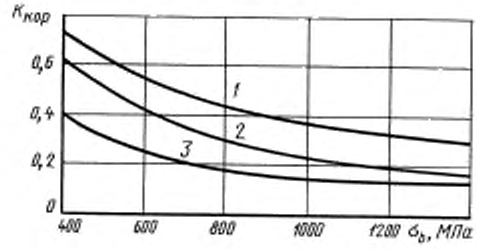
Примечание. При наличии окалины используют нижнюю прямую ($R_z$ = 200 мкм).

**Влияние коррозии до испытания на усталость на предел выносливости стальных образцов (при изгибе с вращением на базе $10^7$ циклов при частоте нагружения 30—50 Гц)**




Черт. 4

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




1 — пресная вода (наличие концентрации напряжений); *2* — пресная вода (отсутствие концентрации напряжений); *3* — морская вода (отсутствие концентрации напряжений)

Черт. 5

*ПРИЛОЖЕНИЕ 5*
*Рекомендуемое*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ $K_V$

1. Коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости вычисляют по формуле

$$K_V = \frac{\sigma_{-1д\ упр}}{\sigma_{-1д}}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{-1д\ упр}$ — предел выносливости упрочненных деталей;

$\sigma_{-1д}$ — предел выносливости неупрочненных деталей.

Средние значения $K_V$ для различных методов поверхностного упрочнения образцов из углеродистых и легированных конструкционных сталей приведены в табл. 1—3.

Таблица 1

**Влияние поверхностной закалки токами высокой частоты (изгиб с вращением, глубина закаленного слоя 0,9—1,5 мм)**

| Вид образца | $K_V$ для образца диаметром | |
|---|---|---|
| | 7—20 мм | 30—40 мм |
| Без концентрации напряжений | 1,3—1,6 | 1,2—1,5 |
| С концентрацией напряжений | 1,6—2,8 | 1,5—2,5 |

Таблица 2

**Влияние химико-термической обработки**

| Характеристика химико-термической обработки | Вид образца | $K_V$ для образцов диаметром | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 8—15 мм | 10 мм | 30—40 мм |
| Азотирование при глубине слоя 0,1-0,4 мм твердости слоя 730...970 НВ | Без концентрации напряжений | 1,15—1,25 | — | 1,10—1,15 |
| | С концентрацией напряжений (поперечное, отверстие, надрез) | 1,90—3,00 | | 1,30—2,00 |
| Цементация при глубине слоя 0,2—0,6 мм | Без концентрации напряжений | 1,20—2,10 | | 1,10—1,50 |
| | С концентрацией напряжений | 1,50—2,50 | | 1,20—2,00 |
| Цианирование при глубине слоя 0,2 мм | Без концентрации напряжений | — | 1,80 | — |

Таблица 3

**Влияние поверхностного наклепа**

| Способ обработки | Вид образца | $K_V$ для образца диаметром | |
|---|---|---|---|
| | | 7—20 мм | 30—40 мм |
| Обкатка роликом | Без концентрации напряжений | 1,20—1,40 | 1,10—1,25 |
| | С концентрацией напряжений | 1,50—2,20 | 1,30—1,80 |
| Обдувка дробью | Без концентрации напряжений | 1,10—1,30 | 1,10—1,20 |
| | С концентрацией напряжений | 1,40—2,50 | 1,10—1,50 |

2. Приведенные в п. 1 значения $K_V$ соответствуют оптимальной технологии упрочнения и отсутствию технологических дефектов. При неправильной технологии упрочнения или наличии дефектов (обрыв поверхностного закаленного слоя в зоне концентрации напряжений, обезуглероживание поверхностного слоя, шлифовочные прижоги и другие дефекты) может получиться не повышение, а даже снижение пределов выносливости.

Поэтому введение в формулу (2) (см. п. 1.1) коэффициентов $K_V$ возможно только при проведении исследований для обоснования технологических режимов упрочнения применительно к конкретной детали и при получении стабильного эффекта упрочнения (в смысле повышения предела выносливости) в условиях производства.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 6*
*Справочное*

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Пример 1.**

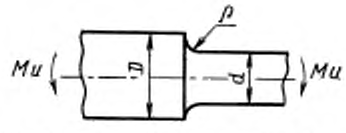
Определить среднее значение и коэффициент вариации предела выносливости вала при изгибе с вращением в месте перехода одного сечения к другому по галтели, показанного на черт. 1.

Вал изготовлен из стали 45, $\sigma_в = 650$ МПа.

Дано: $\bar{\bar{\sigma}}'_{-1} = 300$ МПа; $v_{\sigma_в} = 0{,}07$; поверхностному упрочнению вал не подвергается. Вал изготовлен тонкой обточкой ($Rz \simeq 6{,}3$ мкм).

Находим значение $\alpha_\sigma$ по черт. 27 приложения 3.

Для $\frac{\bar{\bar{D}}}{d} = \frac{120}{100} = 1{,}20$ и $\frac{\bar{\bar{\rho}}}{d} = \frac{10}{100} = 0{,}1$ $\bar{\bar{\alpha}}_\sigma = 1{,}62$.




$D = 120$ мм; $d = 100$ мм; $\rho = (10 \pm 2)$ мм

Черт. 1

2. Определяем значение $\bar{G}$ по формуле табл. 1 настоящего стандарта

$$t = \frac{\bar{D} - \bar{d}}{2} = 10 \text{ мм}; \quad \frac{t}{\bar{\rho}} = \frac{10}{10} = 1;$$

$$\varphi = \frac{1}{4\sqrt{t/\rho} + 2} = \frac{1}{4{,}1 + 2} = 0{,}167;$$

$$\bar{G} = \frac{2{,}3\,(1 + \varphi)}{\rho} + \frac{2}{d} = \frac{2{,}3(1 + 0{,}167)}{10} + \frac{2}{100} = 0{,}268 + 0{,}02 = 0{,}288 \text{ мм}^{-1}.$$

3. Вычисляем значение $\Theta$.

$L = \pi d = 314$ мм — при изгибе с вращением круглого вала;

$$\frac{L}{G} = \frac{314}{0{,}288} = 1090 \text{ мм}^2; \quad \Theta = \frac{L}{G} \cdot \frac{1}{88{,}3} = \frac{1090}{88{,}3} = 12{,}35.$$

4. Для стали 45 можно принять $\nu_\sigma = 0{,}211 - 0{,}000143 \cdot 650 = 0{,}12$. По табл. 4 или по черт. 1 (приложение 4) находим при $\Theta = 12{,}35$; $F(\Theta, \nu_\sigma) = 1{,}15$.

5. Определяем $K_\sigma / K_{d\sigma}$ по формуле (11) настоящего стандарта

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \alpha_\sigma \cdot F(\Theta, \nu_\sigma) = 1{,}62 \cdot 1{,}15 = 1{,}86.$$

4, 5. **(Измененная редакция, Изм. № 1).**

6. Для случая тонкой обточки ($Rz = 6{,}3$ мкм) по черт. 3 (приложения 4) для $\sigma_u = 650$ МПа находим: $K_F = 0{,}91$.

7. Определяем значение $K$ по формуле (2) настоящего стандарта

$$K = \left( \frac{K_\sigma}{k_{u\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_\psi \cdot K_A} = (1{,}86 + \frac{1}{0{,}91} - 1) \cdot 1 = 1{,}96.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

8. Коэффициент анизотропии $K_A = 1$, $K_\psi = 1$.

9. Коэффициент $K_1 = 1$.

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

10. **(Исключен, Изм. № 1).**

11. Среднее значение предела выносливости вала составит:

$$\bar{\bar{\sigma}}_{-1,\text{д}} = \frac{\bar{\bar{\sigma}}_{-1}}{K} = \frac{300}{1{,}96} = 153 \text{ МПа}.$$

Коэффициент вариации $v_{\sigma_{-1,\text{д}}}$ находим по формуле (38) настоящего стандарта

$$v_{\sigma_{-1,\text{д}}} = \frac{0{,}1}{1 + \Theta_\sigma^{0{,}12}} = \frac{0{,}1}{1 + 12{,}35^{0{,}12}} = 0{,}042.$$

Для подсчета коэффициента вариации $v_{\alpha_\sigma}$ находим по черт. 27 (приложения 3) значения $\alpha_\sigma$ при $D/d = 1{,}2$ и двух значениях, близких к 0,1, например при

$$(\rho/d)_1 = 0{,}09, \quad \alpha_{\sigma_1} = 1{,}67, \quad (\rho/d)_2 = 0{,}11, \quad \alpha_{\sigma_2} = 1{,}59.$$

По формуле (44) настоящего стандарта находим

$$\frac{\alpha_\sigma - 1{,}67}{1{,}59 - 1{,}67} = \frac{\rho/d - 0{,}09}{0{,}11 - 0{,}09},$$

откуда $\alpha_\sigma = 2{,}03 - 4 \cdot \rho/d$.

По формуле (43) настоящего стандарта получаем

$$v_{\alpha_\sigma} = \left| \frac{\partial \alpha_\sigma}{\partial \rho} \right|_{\bar{\rho}} \cdot \frac{\bar{\rho}}{\bar{\alpha}_\sigma} \cdot v_\rho = \frac{4}{\bar{\alpha}_\sigma} \cdot \frac{\bar{\rho}}{d} \cdot v_\rho = 0{,}25 v_\rho.$$

Принимая отклонения радиуса $\pm 2$ мм за $3S_\rho$, получим:

$$S_\rho = \frac{2}{3} = 0{,}67 \text{ мм}, \quad v_\rho = \frac{0{,}67}{10} = 0{,}067, \quad v_{\alpha_\sigma} = 0{,}25 \cdot 0{,}067 = 0{,}017.$$

Из-за отсутствия данных коэффициент вариации $v_{\bar{\sigma}_{-1}}$ принимаем равным

$$v_{\sigma_a} : v_{\bar{\sigma}_{-1}} \approx v_{\sigma_в} = 0{,}07.$$

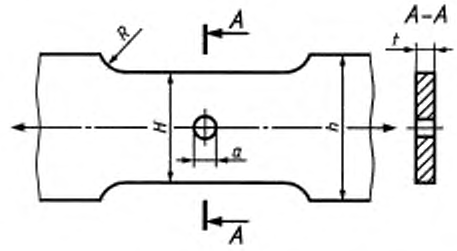
Общий коэффициент вариации предела выносливости вала составит

$$v_{\sigma_{-1д}} = \sqrt{v^2_{\sigma_{max}} + v^2_{\bar{\sigma}_{-1}} + v^2_{\alpha_\sigma}} = \sqrt{0{,}042^2 + 0{,}07^2 + 0{,}017^2} = 0{,}083.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

**Пример 2.**

Определить среднее значение предела выносливости пластины с отверстием при растяжении—сжатии, показанной на черт. 2.




$H = 100$ мм; $a = 10^{+0,1}$ мм; $t = 12$ мм.

Черт. 2

Пластина изготовлена из стали марки Ст.3. $Rz = 50$ мкм.

$$\bar{\sigma}_в = 402 \text{ МПа}; \quad \bar{\bar{\sigma}}'_{-1} = 185 \text{ МПа}; \quad v_{\sigma_в} = 0{,}06; \quad \bar{\bar{\sigma}}_т = 270 \text{ МПа}.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

1. Определяем значение $\alpha_\sigma$ на черт. 29 (приложения 3)

для $\frac{a}{H} = \frac{10}{100} = 0{,}10$ ; $\alpha_\sigma = 2{,}73$.

2. Определяем значение $\bar{\bar{G}}$ по формуле табл. 1 настоящего стандарта

$$\bar{\bar{G}} = \frac{2{,}3}{\rho} = \frac{2{,}3}{5} = 0{,}46 \text{ 1/мм } (\rho = \frac{a}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ мм}).$$

3. Находим коэффициент $n$ по черт. 14 (приложения 2)

$$n = 1{,}12.$$

4. Определяем коэффициент $K_\sigma$ по формуле (13) настоящего стандарта

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{n} = \frac{2{,}73}{1{,}12} = 2{,}44.$$

5. Определяем параметр $v_\sigma$ по формуле (27) настоящего стандарта $v_\sigma = 0{,}211 — 0{,}000143 \cdot 402 = 0{,}15$.

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

5а. Определяем значения $L$, $\bar{\bar{G}}$ и $\Theta_{1д}$ для аналогичной пластины без концентратора напряжений по табл. 1 и приложению 4 (черт. 2) настоящего стандарта

$$L = 2t = 2 \cdot 12 = 24 \text{ мм},$$

$$\varphi = \frac{1}{4\sqrt{\frac{t}{\rho}} + 2} = \frac{1}{4\sqrt{\frac{10}{50}} + 2} = 0{,}26,$$

$$\bar{\bar{G}} = \frac{2{,}3\,(1 + \varphi)}{\rho} = \frac{2{,}3\,(1 + 0{,}26)}{50} = 0{,}058,$$

$$\Theta_{1д} = \frac{L/\bar{\bar{G}}}{7{,}5} = \frac{24}{0{,}058 \cdot 7{,}5} = 55.$$

**(Введен дополнительно, Изм. № 1).**

6. Определяем коэффициент $K_{d\sigma}$ по формуле (12) настоящего стандарта

$$K_{d\sigma} = 0{,}5(1 + \Theta_{r.s}^{-\nu_\sigma}) = 0.5(1 + 55^{-0{,}15}) = 0{,}77,$$

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{2{,}44}{0{,}77} = 3{,}17.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

7. По черт. 3 (приложение 4) находим $K_F = 0{,}89$.

8. Коэффициент $K$ определяем по формуле (2) настоящего стандарта

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1\right)\frac{1}{K_y \cdot K_A} = (3{,}17 + \frac{1}{0{,}89} - 1) \cdot 1 = 3{,}29.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

9, 10. **(Исключены, Изм. № 1).**

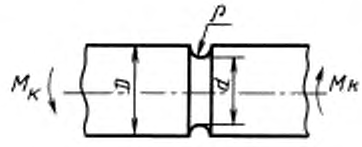
11. Средний предел выносливости пластины с отверстием вычисляем по формуле (1) настоящего стандарта (коэффициент $K_1 = 1$ для углеродистых сталей)

$$\bar{\sigma}_{-1s} = \frac{185}{3{,}29} = 56{,}2 \text{ МПа}.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

**Пример 3.**

Определить среднее значение предела выносливости вала с канавкой при кручении (черт. 3).




$D = 200$ мм; $d = 180$ мм; $\rho = (1{,}8 \pm 0{,}3)$ мм.

Черт. 3

Вал изготовлен из стали марки 40ХН. $\sigma_в = 820$ МПа, $\sigma_т = 650$ МПа, $\bar{\bar{\tau}}'_{-1} = 240$ МПа, $\nu_{\sigma_в} = 0{,}07$; канавку изготовляют тонкой обточкой и поверхностному упрочнению не подвергают ($Rz = 6{,}3$ мкм).

1. Находим значение $\alpha_\tau$ по черт. 18 (приложения 3) при

$$\frac{\bar{\rho}}{D} = \frac{1{,}8}{200} = 0{,}009 \text{ и } \frac{\bar{d}}{D} = \frac{180}{200} = 0{,}9 \; \alpha_\tau = 2{,}6.$$

2. Определяем значение $q$ по черт. 15 (приложения 2)

$$q = 0{,}96.$$

3. Величину $K_\tau$ определяем по формуле (19) настоящего стандарта

$$K_\tau = 1 + q(\alpha_\tau - 1) = 1 + 0{,}96(2{,}6 - 1) = 2{,}54.$$

4. Для $d = 180$ мм принимаем $K_2 = 0{,}8$.

5. Определяем параметры $\nu_\sigma$ и $\nu_\tau$ по формулам (27) и (28) настоящего стандарта:

$$\nu_\sigma = 0{,}211 - 0{,}000143 \cdot 820 = 0{,}09,$$

$$\nu_\tau = 1{,}5 \cdot 0{,}09 = 0{,}140.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

5.1. Определяем значение $\Theta_{r.s}$ по п. 1.2.3.1 настоящего стандарта

$$\Theta_{r.s} = \left(\frac{d_{r.s}}{7{,}5}\right)^2 = \left(\frac{180}{7{,}5}\right)^2 = 576.$$

5.2. Вычисляем коэффициент $K_{d\tau}$ по формуле (12) настоящего стандарта

$$K_{d\tau} = 0{,}5(1 + \Theta_{\tau\sigma}^{-\gamma_\sigma}) = 0{,}5(1 + 576^{-0{,}14}) = 0{,}71.$$

5.3. Определяем отношение $\frac{K_\tau}{K_{d\tau}}$

$$\frac{K_\tau}{K_{d\tau}} = \frac{2{,}54}{0{,}71} = 3{,}58.$$

5.1—5.3. **(Введены дополнительно, Изм. № 1).**

6. Из черт. 3 (приложения 4) определяем коэффициент $K_F$ для тонкой обточки ($Rz$ = 6,3 мкм)

$$K_F = 0{,}89.$$

7. При отсутствии поверхностного упрочнения

$$K_v = 1.$$

8. При кручении $K_1 = 1$ (см. п. 1.11.2).

9. Коэффициент $K$ равен

$$K = (3{,}58 + \frac{1}{0{,}89} - 1) \cdot \frac{1}{1 \cdot 1} = 3{,}7.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

10. Принимаем коэффициент $K_1$ для $d$ = 180 мм равным 0,74 (п. 1.3.1).

11. Вычисляем предел выносливости материала заготовки по формуле (6) настоящего стандарта

$$\bar{\bar{\tau}}_{-1} = 0{,}74 \cdot 240 = 178 \text{ МПа}.$$

12. Вычисляем средний предел выносливости вала по формуле (4) настоящего стандарта

$$\bar{\bar{\tau}}_{-1д} = \frac{178}{3{,}7} = 48{,}1.$$

**(Измененная редакция, Изм. № 1).**

*ПРИЛОЖЕНИЕ 7*
*Справочное*

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАНДАРТА

Настоящий стандарт является унифицированным стандартом СССР и ГДР, разработанным по плану унификации стандартов двух стран.

В основу стандарта положены методы оценки пределов выносливости и других характеристик сопротивления усталости деталей, вошедшие в стандарты ГДР [1,5—7] и в справочные руководства СССР [2—4].

Излагаются методы оценки медианных значений пределов выносливости деталей $\bar{\bar{\sigma}}_{-1д}$ и их коэффициентов вариации $V_{\sigma_{-1д}}$, что позволяет определять значения пределов выносливости $(\sigma_{-1д})_P$, соответствующие заданной вероятности $P$ %.

Наиболее точным методом определения коэффициентов $K$, отражающих суммарное влияние всех факторов на пределы выносливости, является экспериментальный метод (п. 1.2.1).

Для расчетного определения эффективных коэффициентов концентрации $K_\sigma$, $K_\tau$ и отношений $K_\sigma/K_{d\sigma}$, $K_\tau/K_{d\tau}$ предлагаются три метода, изложенные в порядке предпочтительного использования, зависящего от имеющейся исходной информации.

Первый метод, изложенный в п. 1.2.3.1, формулы (11), (12), основан на статистической теории подобия усталостного разрушения [4]. Эта теория получила апробирование во многих лабораториях СССР в течение последних 20 лет и успешно используется в ряде отраслей машиностроения. В случае экспериментального определения коэффициентов $\nu_\sigma$ и $\nu_\tau$ путем испытаний на усталость образцов и моделей в статистическом аспекте ошибка в оценке отношений $K_\sigma/K_{d\sigma}$ не превышает 4 % с вероятностью 95 %. При испытаниях по стандартной методике ограниченного числа образцов каждого типоразмера для определения $\nu$ ошибка не превышает 8 % с вероятностью 95 %.

При затруднениях с определением параметра $L$, а следовательно и критерия подобия $\Theta$, входящего в формулы (11), (12), рекомендуется использовать приближенный метод Зибеля и Штилера, представленный формулами (13), (14), рекомендуемый стандартом ГДР TGL 19340. Для этой же цели допускается применение формул (18), (19), основанных на использовании коэффициентов чувствительности металла к концентрации напряжений $q$, рекомендуемых в американской справочной литературе /8/, а также в ряде руководств в СССР. Следует иметь в виду, что формулы (13)—(19) приводят к погрешностям существенно большим (до 20 %), чем формулы (11), (12). Формулы (29), (30) для коэффициентов влияния качества обработки поверхности $K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$, формула (20) для коэффициента влияния абсолютных размеров и формула (15) получены разработчиками стандарта ГДР Б. Хенелем, Г. Виртгеном и К. Шустером (Институт легких конструкций г. Дрезден) путем аппроксимации эмпирических графиков, приведенных в TGL 19340.

В разд. 3 стандарта изложен метод оценки коэффициентов вариации пределов выносливости $V_{\sigma_{-1a}}$, вытекающий из теории подобия усталостного разрушения [4]. В связи с оценкой коэффициентов $V_{\sigma_{-1a}}$ вводят два медианных значения предела выносливости гладких лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм при изгибе с вращением $\sigma_{-1}$, $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}$, определенное на образцах металла одной плавки, и $\bar{\bar{\bar{\sigma}}}_{-1}$, определенное на множестве всех плавок металла данной марки. В связи с этим коэффициент вариации $V_{\bar{\bar{\sigma}}-1}$ (формулы 35—37) учитывает межплавочный разброс величин $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}$.

Известно, что с ростом размеров заготовки при термообработке снижаются механические свойства металла ($\sigma_в$, $\sigma_т$, $\sigma_{-1}$), определенные на лабораторных образцах малых размеров ([2], фиг. 41, стр. 129). В связи с этим вводят коэффициент $K_1$ (формула (3)), равный отношению пределов выносливости $\bar{\bar{\bar{\sigma}}}_{-1}$ и $\bar{\bar{\bar{\sigma}}}'_{-1}$, определенных на лабораторных образцах диаметром $d_0 = 7{,}5$ мм, изготовленных из заготовок размером $d$ (таким же, как размер натурной детали) и размером 10—20 мм соответственно.

Теоретические коэффициенты концентрации $\alpha_\sigma$, $\alpha_\tau$ предлагается определять по номограммам и формулам Нейбера, по графикам, приведенным в работе [8], а также по приближенной формуле (25), заимствованной из TGL 19340. Последнюю формулу используют в случае необходимости вычислений $\alpha_\sigma$ на ЭВМ.

Величины $\nu_\sigma$, $\nu_\tau$, являющиеся параметрами уравнения подобия усталостного разрушения [4], характеризуют чувствительность металла к концентрации напряжений и влиянию абсолютных размеров поперечного сечения. С ростом $\nu_\sigma$ чувствительность к концентрации напряжений уменьшается, а влияние абсолютных размеров на величины пределов выносливости усиливается.

Значения $\nu_\sigma$, $\nu_\tau$ находят экспериментально по методике, выбирают 4—5 или более типоразмеров образцов с различными значениями критерия подобия усталостного разрушения $\Theta$ (так, чтобы диапазон изменения $\Theta$ был по возможности наибольшим). Находят пределы выносливости этих образцов, причем предпочтительно методом «лестницы» или «пробит»-методом. По найденным значениям строят зависимость $\lg(\xi - 1)$ от $\lg\Theta$, соответствующую уравнению подобия [4].

$$\lg(\xi - 1) = -\nu_\sigma \cdot \lg\Theta, \tag{1}$$

где

$$\xi = \frac{\alpha_\sigma \cdot \sigma_{-1a}}{0{,}5\bar{\bar{\sigma}}_{-1}}.$$

Значение $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}$ находят путем предварительного построения зависимости $\sigma_{max} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_{-1a}$ от $\lg\Theta$ и ее осреднения. По зависимости (1), найденной методом наименьших квадратов, определяют значение $\nu_\sigma$.

В случае невозможности проведения экспериментов значения $\nu_\sigma$ и $\nu_\tau$ определяют по корреляционным зависимостям (27) и (28).

Расчетные характеристики для оценки долговечности при малоцикловом нагружении определяют применительно к широко используемому подходу, основывающемуся на учете местных циклических деформаций в конструкциях. Расчет выполняют с привлечением деформационно-кинетических критериев малоцикловой прочности, трактующих достижение предельного состояния в виде критических величин квазистатических и усталостных повреждений и их сумм в линейной форме. Расчет ведут в деформациях (циклических упругопластических и односторонне накопленных).

Учитывают кинетику односторонне накопленных и циклических деформаций в процессе нагружения в максимально напряженных зонах конструкции, а также деформационную способность материала при статическом (квазистатическом) и малоцикловом нагружениях. Первая характеризуется располагаемой пластичностью, вторая — кривой малоцикловой усталости конструкционного материала.

Изменяющиеся от цикла к циклу диаграммы деформирования используют в форме обобщенной диаграммы, отражающей процессы циклического упрочнения, разупрочнения и стабилизации. Указанная обобщенная диаграмма вошла в практику расчетов при малоцикловом нагружении.

Задачу о напряженно-деформированном состоянии элементов конструкций решают расчетным и экспериментальными методами в циклической упругопластической постановке.

Названные подходы систематически изложены в ряде изданий [3, 9—11].

## БИБЛИОГРАФИЯ


[1] DDR—Standard TGL 19340, Blatt 1 bis 4 (2 Entwurf, Juli 1974) Maschinenbauteile, Dauerschwingfestigkeit

[2] Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты на прочность деталей машин. М., Машгиз, 1963, с. 451

[3] Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты на прочность деталей машин. М., «Машиностроение», 1975, с. 488

[4] Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М., «Машиностроение», 1977

[5] Hänel B., Wirthgen G. Neufassung des DDR — Standards TGL 19330 «Schwingfestigkeit, Begriffe und Zeichen». IfL—Mitt, Dresden, 18 (1979) 5, s. 178—191

[6] C. Schuster und C. Wirthgen. Aufbau und Anwendung der DDR—Standards TGL 19340 (Neufassung) «Maschinenbauteile, Dauerschwingfestig-keit», IfL—Mitt., Dresden, 14 (1975) Heft 1/2, s. 3—29

[7] B/Hanel und G. Wirthgen. Zum DDR—Standards TGL 36766 «Schwigfestigkeit, Ermüdungsprüfung von Werkstoffproben», IfL—Mitt., Dresden, 1979, 5, s. 211—215

[8] Петерсон Р.Е. Концентрация напряжений. М., «Мир», 1977, с. 302

[9] Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. Изд. Моск. университета, 1965, с. 263

[10] Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М., «Наука», 1979, с. 295

[11] Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М., «Машиностроение», 1981, с. 272

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. **РАЗРАБОТАН Академией наук СССР, Государственным комитетом СССР по стандартам, Министерством высшего и среднего специального образования СССР, Министерством тракторного и сельскохозяйственного машиностроения**

2. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ ПОСТАНОВЛЕНИЕМ Государственного комитета СССР по стандартам от 18.05.82 № 1972**

3. **Стандарт унифицирован со стандартами ГДР TGL 19340/03 и TGL 19340/04**

4. **ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ**

5. **ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ**

| Обозначение НТД, на который дана ссылка | Номер пункта, приложения |
|---|---|
| ГОСТ 25.502—79 | 5.4.1, 5.6.1, приложение 1 |
| ГОСТ 1497—84 | 5.4.1, 5.4.5, 5.5.1 |
| ГОСТ 23207—78 | Вводная часть |

6. **Ограничение срока действия снято по протоколу № 3—93 Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 5-6—93)**

7. **ИЗДАНИЕ с Изменением № 1, утвержденным в декабре 1988 г. (ИУС 4—89)**

gost.e-ecolog.ru