

ТЕМА 7. РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ

Большинство деталей машин и механизмов находятся в движении, при этом нагрузки, действующие на них меняются во времени или меняется положение детали по отношению к нагрузке. Это приводит к появлению циклических (периодических) напряжений в деталях.

Разрушение деталей под действием переменных напряжений называют *усталостным разрушением*.

Способность деталей сопротивляться усталостному разрушению называют *выносливостью* (циклической прочностью).

Усталостное разрушение происходит при напряжениях, меньших σ_b и даже σ_T , в этом его опасность.

При вращении бруса с угловой скоростью ω в произвольной точке A в момент времени

$$\sigma_z^A = \frac{N_z}{A} \pm \frac{M_x}{I_x} Y_A = \frac{P_1}{A} \pm \frac{P_2 a}{W_x} \sin(\omega t), \quad (129)$$

где $\omega t = \varphi$; $W_x = I_x / r$; $Y_A = r \sin(\omega t)$, т.е. σ_z^A меняются по синусоидальному закону со средним напряжением $\sigma_m = P_1 / A$ и амплитудой $\sigma_a = P_2 a / W_x$.

Совокупность последовательных значений напряжений за период называют *циклом*.

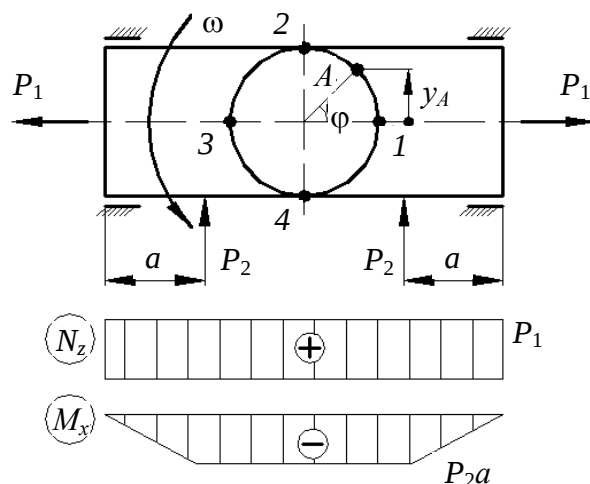


Рис. 81

Рассмотренный цикл называют *асимметричным* ($\sigma_m \neq 0$).

Цикл полностью характеризуют две величины (рис. 82)

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a; \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \text{ или } \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}.$$

Коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

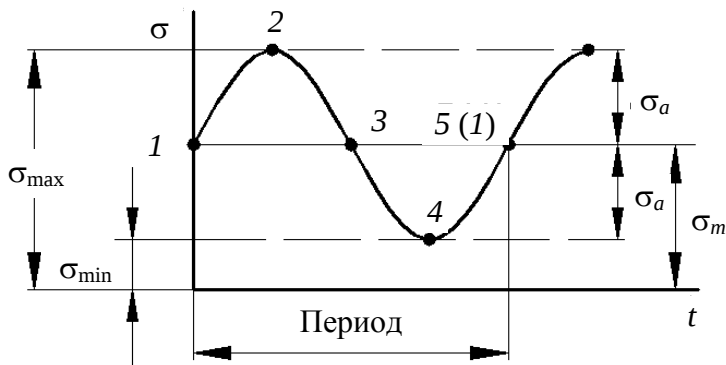


Рис. 82

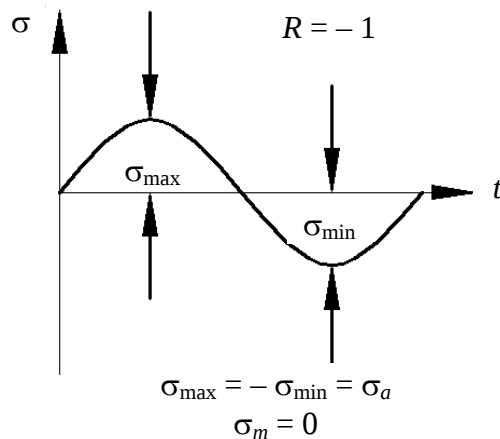


Рис. 83

Частными случаями асимметричного цикла являются симметричный цикл (рис. 83) и пульсационные циклы (рис. 84).

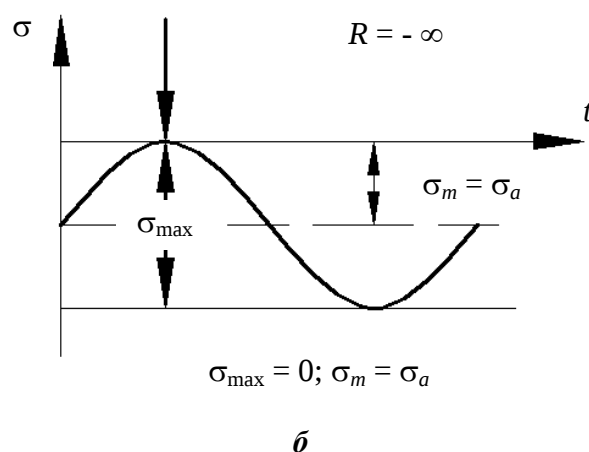
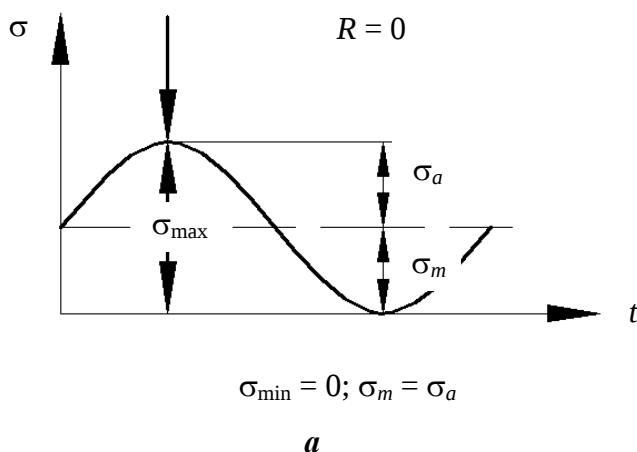


Рис. 84

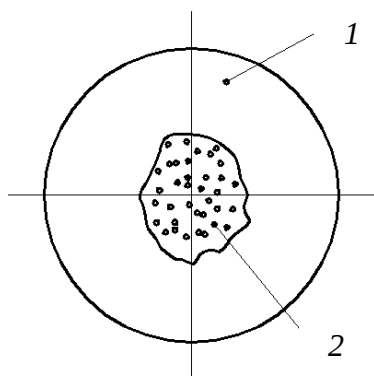


Рис. 85

Число циклов, выдержанное деталью до разрушения, меняется от 5 до 10 (например, многократный изгиб проволоки) до миллионов в зависимости от $\sigma_{\max}$. При малых $\sigma_{\max}$ деталь работает неограниченно долго. Причина усталостного разрушения – возникновение микротрещин в зоне повышенных напряжений (обычно на поверхности детали либо около внутреннего дефекта). При статических нагрузках микротрещины не опасны. При переменных

напряжениях микротрещина растет, а в зоне сжимающих напряжений стенки ее притираются.

На изломе вала наблюдают две характерные зоны (рис. 85):

- 1 – гладкая (притертая) зона развития трещины;
- 2 – крупнозернистая зона внезапного разрушения.

Циклическую прочность материала оценивают *пределом выносливости*.

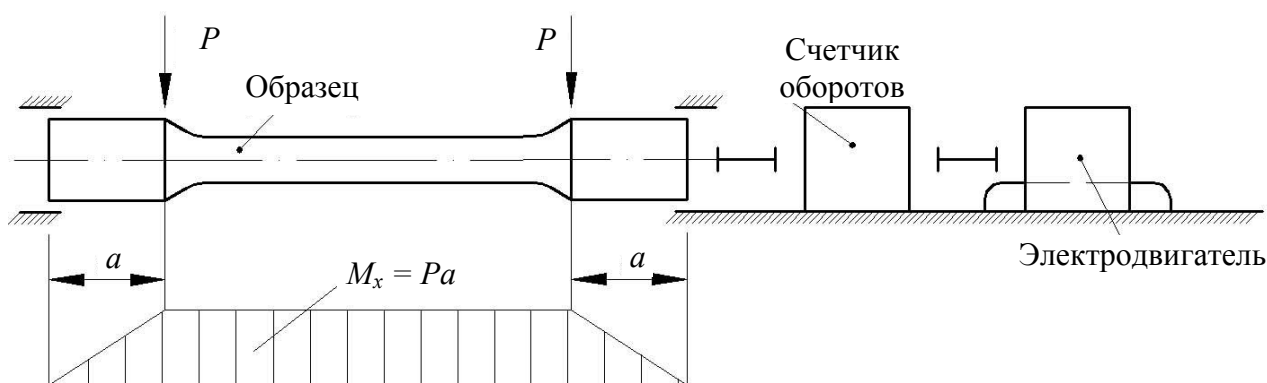


Рис. 86

Его определяют, испытав партию (8 ÷ 10 штук) стандартных полированных образцов, вращающихся в условиях чистого изгиба до разрушения. В первом образце создают напряжение

$$\sigma_{\max}^{(1)} = \frac{M_x}{W_x} \approx 0,7\sigma_B.$$

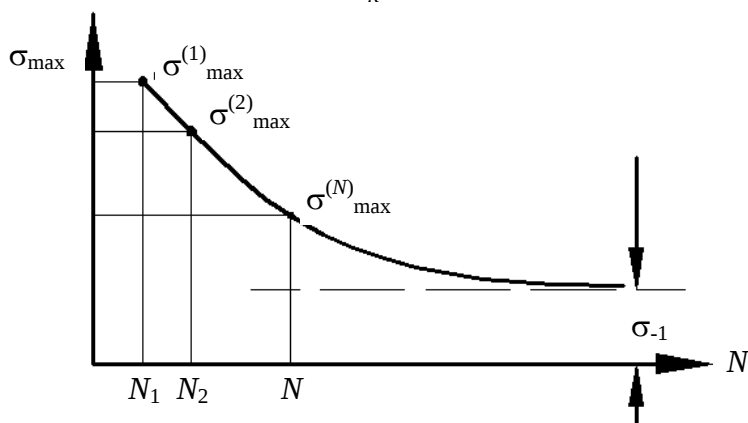


Рис. 87

Счетчик фиксирует число оборотов (циклов) до разрушения – N_1 . Во втором образце $\sigma_{\max}^{(2)} < \sigma_{\max}^{(1)}$ и он разрушится при числе циклов $N_2 > N_1$ и так далее (рис. 87).

График $N = f(\sigma_{\max})$ называют *кривой выносливости*.

Если стальной образец не разрушится, выдержав $N = 10^7$ циклов, то он не разрушится неограниченно долго. Это число циклов называют *базовым*.

Для цветных металлов не удастся установить число циклов, выдержав которое, образец не разрушится в дальнейшем. В этих случаях применяют за базовое $N = 10^8$ циклов.

Наибольшее значение максимального напряжения цикла, при котором образец не разрушится при базовом числе циклов называют *пределом выносливости* σ_R .

Для симметричного цикла: $R = -1$ и предел выносливости σ_{-1} . Для пульсационного: $R = 0$ и предел выносливости σ_0 .

Если деталь предназначена для N циклов работы (после чего ее заменяют), то по кривой выносливости можно определить для нее ограниченный предел выносливости σ_{-1N} .

Экспериментально найдено для сталей $\sigma_{-1} \approx (0,4 \div 0,5)\sigma_B$, для цветных металлов – $\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,5)\sigma_B$. При кручении: для пластичных материалов $\tau_{-1} \approx 0,6 \sigma_{-1}$, а для хрупких – $\tau_{-1} \approx 0,8 \sigma_{-1}$.

По известным значениям предела выносливости σ_R и коэффициента асимметрии R строится диаграмма предельных амплитуд в координатах $\sigma_m - \sigma_a$. Для этого необходимо в выражениях σ_a и σ_m заменить $\sigma_{\max} = \sigma_R$, а $\sigma_{\min} = R\sigma_{\max}$,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_R(1+R)}{2}; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_R(1-R)}{2}.$$

Обычно диаграмма предельных амплитуд (рис. 88) строится по трем точкам: точка A соответствует симметричному циклу ($\sigma_a = \sigma_{-1}$), точка B соответствует пульсационному циклу ($R = 0$, $\sigma_a = \sigma_a = \sigma_0 / 2$), точка C соответствует пределу прочности при статическом растяжении ($\sigma_m = \sigma_B$).

Для пластичных материалов максимальное напряжение не должно превышать предела текучести материала σ_T , т.е. $\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m = \sigma_T$. Этому условию отвечает прямая DE . Смысл диаграммы: если точка K с параметрами цикла σ_m и σ_a нашего образца на диаграмме расположена ниже линии ABC , то образец выдержит неограниченное число циклов (не менее базового); если выше – то разрушение произойдет при ограниченном числе циклов.

Установлено, что предел выносливости σ_R (τ_R) конкретной детали существенно меньше предела выносливости стандартного образца, т.е. он не является характеристикой только свойств материала ($E, \gamma, G, \sigma_B, \sigma_T$), а зависит от концентрации напряжений, размеров детали, качества обработки поверхности и от применяемых технологических методов поверхностного упрочнения детали.

Концентрация напряжений – явление повышения напряжений в местах резкого изменения формы тела (около отверстий, вырезов в зоне контакта и т.д.).

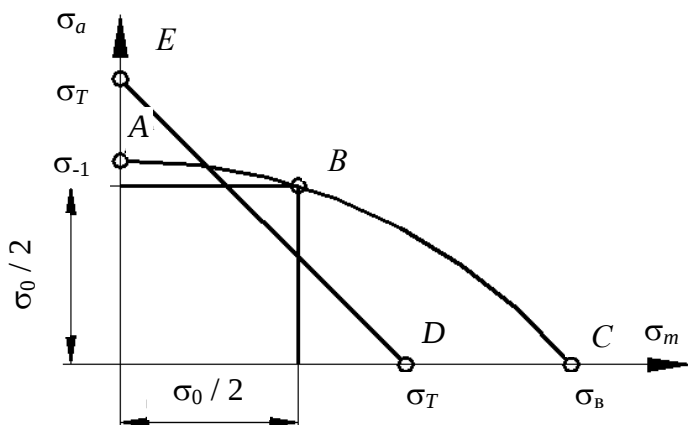


Рис. 88

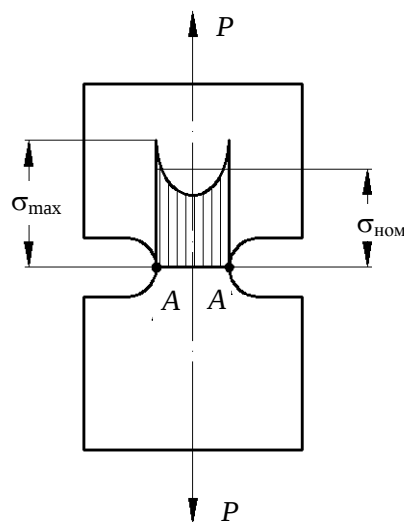


Рис. 89

$\sigma_{\max}$ — максимальное напряжение, определяемое методами теории упругости либо экспериментально.

$\sigma_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение, определяемое по формулам сопротивления материалов для наименьшего сечения ($\sigma_{\text{ном}} = P / A$). Количественно концентрация напряжений (рис. 89) оценивается теоретическими коэффициентами концентраций напряжений

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad \alpha_{\tau} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{ном}}}.$$

Величины α_{σ} и α_{τ} для различных случаев приводятся в справочниках. При статическом нагружении концентрация напряжений не опасна. Статическая разрушающая сила P для пластины с отверстием и без него примерно одинакова (при одинаковой площади сечения). При переменных напряжениях в зоне концентрации возникает и развивается микротрещина — причина разрушения.

Снижение предела выносливости с увеличением размеров детали называют *масштабным эффектом*.

Общепринятого объяснения масштабного эффекта пока нет.

Обычно усталостное напряжение начинается у поверхности, поэтому ее состояние влияет на предел выносливости, который значительно снижается при худшем качестве обработки поверхности.

Применение различных технологических методов поверхностного упрочнения (обдувка дробью, обкатка роликами, закалка поверхности токами высокой частоты и т.д.) значительно повышает предел выносливости.

Влияние всех этих факторов на предел выносливости учитывается коэффициентами, определяемыми экспериментально

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_k}; \quad K_{d\sigma} = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}}; \quad K_{F\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}}; \quad K_v = \frac{(\sigma_{-1})_{\text{упр}}}{\sigma_{-1}},$$

где K_{σ} — эффективный коэффициент концентрации напряжения; $K_{d\sigma}$ — коэффициент масштабного фактора; $K_{F\sigma}$ — коэффициент качества поверхности; K_v — коэффициент поверхностного упрочнения; σ_{-1} — предел выносливости стандартных образцов с полированной поверхностью и с диаметром 7,5 мм; $(\sigma_{-1})_k$ — пре

дел выносливости образцов с концентратором напряжений (но тех же размеров и с таким же качеством поверхности, что и стандартные); $(\sigma_{-1})_d$ – предел выносливости образцов диаметром d , соответствующим размерам детали; σ_{-1} – предел выносливости образцов с такой же обработкой поверхности, как и у детали; $(\sigma_{-1})_{\text{упр}}$ – предел выносливости стандартного образца с поверхностным упрочнением детали.

Экспериментально установлено: $K_\sigma = 1 + q (\alpha_\sigma - 1)$, где q – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений. Для высокопрочных легированных сталей $q \approx 1$; для конструкционных сталей $q \approx 0,6 \div 0,8$; для серого чугуна $q \approx 0$.

Теперь, зная σ_{-1} и, определив по справочникам K_σ , $K_{d\sigma}$, $K_{F\sigma}$, и K_v можно найти предел выносливости конкретной детали

$$(\sigma_{-1})_d = \frac{\sigma_{-1}}{K},$$

где по результатам последних экспериментальных работ рекомендуется принимать

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{K_y}. \quad (130)$$

Теперь по диаграмме предельных амплитуд можно определить коэффициент запаса усталостной прочности. Для упрощения расчетов заменим криволинейный участок AB диаграммы предельных амплитуд прямой. Получим схематизированную диаграмму AKD (рис. 90).

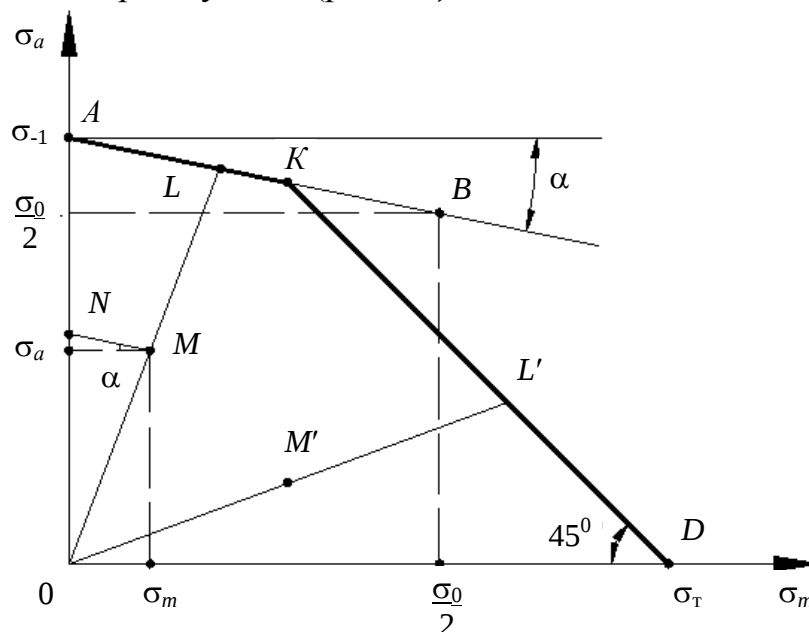


Рис. 90

Пусть характеристики σ_m и σ_a рабочего цикла образца соответствуют на диаграмме точке M . Проведем из начала координат луч через точку M . Точки этого луча соответствуют подобным циклам, т.е. циклам, имеющим одинаковую характеристику R . Цикл, изображенный точкой L – предельный, так как максимальное напряжение этого цикла, определяемое как сумма

абсциссы и ординаты точки L , равно пределу выносливости. Из точки M проведем луч $MN \parallel AB$, т.е. под углом α к горизонтальной оси.

При условии подобия заданного и предельного циклов коэффициент запаса будет

$$n_{\sigma} = \frac{OL}{OM} = \frac{OA}{ON} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m}, \quad (131)$$

где $\psi_{\sigma} = \operatorname{tg} \alpha$ – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла напряжений.

Для стали этот коэффициент можно определить по эмпирической зависимости

$$\psi_{\sigma} = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B; \quad (\sigma_B \text{ в МПа});$$

$$\psi_{\tau} = \psi_{\sigma} / 2.$$

Аналогично для касательных напряжений

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a + \psi_{\tau} \tau_m}. \quad (132)$$

Если прочность образцов определяется текучестью материала (точка M), то коэффициенты запаса равны

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_a + \sigma_m}; \quad n_{\tau} = \frac{\tau_T}{\tau_a + \tau_m}. \quad (133)$$

Для конкретной детали надо учесть влияние коэффициента снижения предела выносливости K . Эксперименты показывают, что этот коэффициент влияет только на переменную составляющую цикла, т.е. на σ_a , поэтому окончательные формулы для определения коэффициента запаса усталостной прочности по нормальным напряжениям имеет вид

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m}, \quad (134)$$

коэффициент запаса усталостной прочности по касательным напряжениям

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{K \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m}. \quad (135)$$

Коэффициенты запаса прочности детали по пределу текучести имеют вид

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_T}{K \sigma_a + \sigma_m}; \quad n_{\tau} = \frac{\tau_T}{K \tau_a + \tau_m}. \quad (136)$$

Если в детали возникают одновременно и нормальные и касательные напряжения, то коэффициент запаса усталостной прочности можно определить по эмпирической формуле Гафа и Полларда

$$n = \frac{n_{\sigma} n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}; \quad 1,3 \leq n \leq 2,0.$$