

Основы расчета на прочность при постоянных и переменных нагрузках

Под *статическим нагружением* принято понимать такую нагрузку, скорость изменения которой незначительная или равна нулю (рис. 2). При нагрузках, вызывающих в сечениях деталей статические напряжения оценка прочности чаще всего проводится методом сравнения расчетных напряжений с допускаемыми:

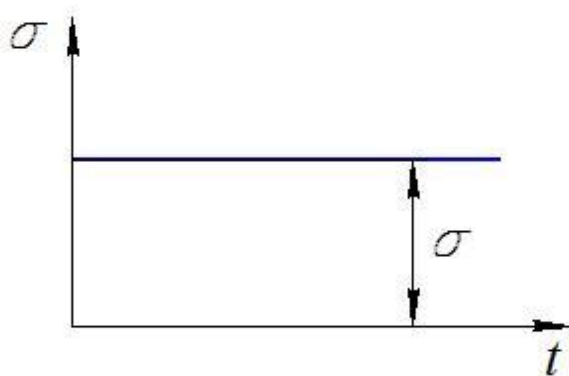


Рис. 2 Статическое нагружение

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ или } \tau \leq [\tau],$$

$$S \geq [S],$$

$$S = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{max}}} \geq [S],$$

$$\text{где } [\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{[S]} \text{ или } [\tau] = \frac{\tau_{\text{пред}}}{[S]}$$

$\sigma_{\text{пред}}$, $\tau_{\text{пред}}$ – предельное нормальное и касательное напряжения при достижении которых деталь выходит из строя вследствие недопустимо большой остаточной деформации или вследствие разрушения;

$[S]$ – минимально допустимый коэффициент запаса прочности.

Выбор $\sigma_{\text{пред}}$ или $\tau_{\text{пред}}$ при таком нагружении зависит от состояния материала (пластичный или хрупкий).

Для пластичных материалов под предельным напряжением понимают соответствующие пределы текучести (σ_{T}). Для хрупких материалов неоднородной структуры, а также высокопрочных сталей, в качестве предельного напряжения следует принимать предел прочности ($\sigma_{\text{пр}}$)

В пластине (рис. 3) растянутой силой F , σ в сечении **I-I** распределены равномерно. В сечении же **II-II**, где выполнено отверстие, распределение напряжений иное. У края отверстия напряжений больше чем в сечении **I-I** примерно в 3 раза. Причины, вызывающих местное увеличение напряжения называются концентраторами напряжений. Само явление увеличения местного напряжения вблизи концентратора называется концентрацией напряжения.

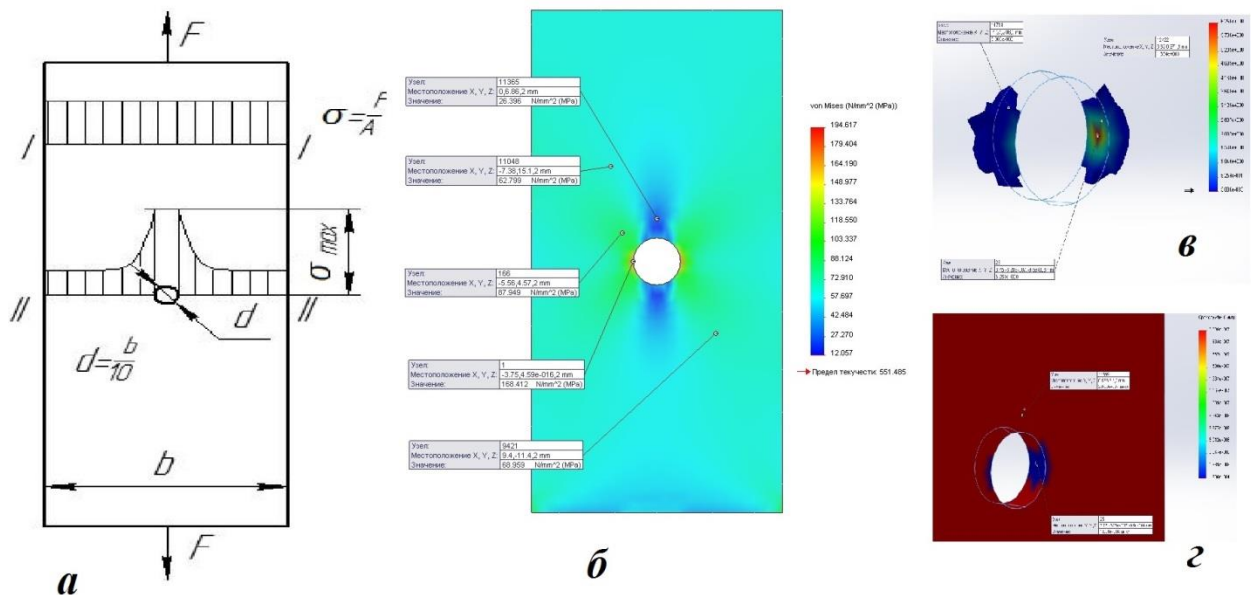


Рис. 3 Влияние концентратора напряжений (отверстия) на усталостную прочность детали:

а – нагруженная пластина с эярами напряжений; **б** – распределение нормальных напряжений в пластине (статическое нагружение); **в** – локализация наиболее подверженных разрушению мест при циклическом нагружении; **г** – прогнозируемый срок службы детали

При статических нагружениях концентрация напряжений не снижает несущую способность деталей, выполненных из пластичных материалов. Это объясняется местными пластическими деформациями способствующими перераспределению и выравниванию напряжений в сечениях детали. На прочность оказывает влияние лишь размер детали:

$$\sigma_{пред,д} = \sigma_T \cdot \varepsilon_{\sigma_T} - \text{материал пластичный};$$

$$\text{где } \varepsilon_{\sigma_T} = \frac{\sigma_T \cdot d}{\sigma_T} - \text{масштабный фактор};$$

$$\sigma_{T,d} - \text{предел текучести образца любых размеров};$$

$$\sigma_T - \text{предел текучести стандартного образца.}$$

Концентрация напряжений учитывается при определении $\sigma_{пред}$ для хрупких материалов неоднородной структуры введением эффективного коэффициента концентрации напряжений K_S (при статическом нагружении – рис. 4). Учитывается также и размер детали (ε_{σ_B}):

$$K_S = \frac{\sigma_B}{\sigma_{BK}},$$

$$\sigma_B - \text{предел прочности образца без концентратора напряжений};$$

$$\sigma_{BK} - \text{предел прочности образца с концентратором напряжений, } K_S > 1;$$

$$\varepsilon_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B \cdot d}{\sigma_B},$$

$$\sigma_{B,d} - \text{предел прочности образца любых размеров};$$

$$\sigma_B - \text{предел прочности стандартного образца.}$$

Тогда $\sigma_{\text{пред.д}} = \sigma_{\text{в}} \cdot \frac{1}{K_S} \cdot \varepsilon_{\sigma_{\text{в}}}$ – хрупкий материал (чугун, высокопрочные стали).

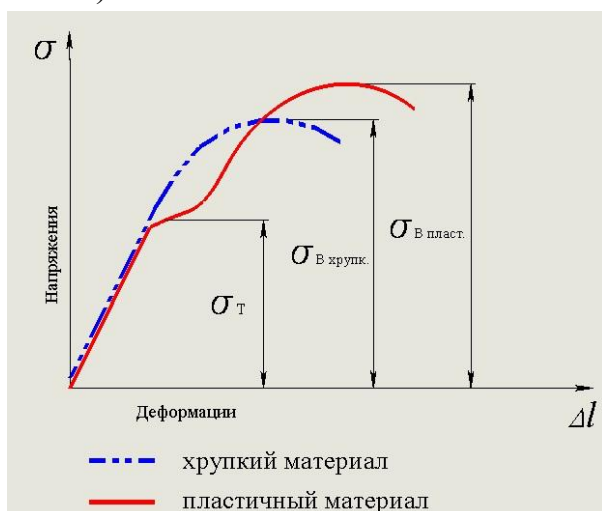


Рис. 4 Диаграмма напряжение–деформация для различных типов материала

Прочность материалов при переменных нагрузках

Детали, подвергающиеся длительной повторно-переменной нагрузке, разрушаются при напряжениях значительно меньших предела прочности материала при статическом нагружении. Это имеет большое значение для современных быстроходных машин, детали которых работают в условиях циклических нагрузок, при общем числе циклов, равном нескольким миллионам. Статистика показывает, что около 80-90% аварий машин, возникающих в процессе эксплуатации, вызвано усталостными явлениями (действием переменных напряжений).

Переменные напряжения в детали могут возникнуть при действии не только переменных, но и постоянных нагрузок. Например, вращающаяся ось железнодорожного вагона (рис. 5) находится под действием постоянной нагрузки (некоторыми изменениями нагрузки при движении вагона пренебрегаем), однако напряжения в поперечном сечении оси изменяются по симметричному циклу.

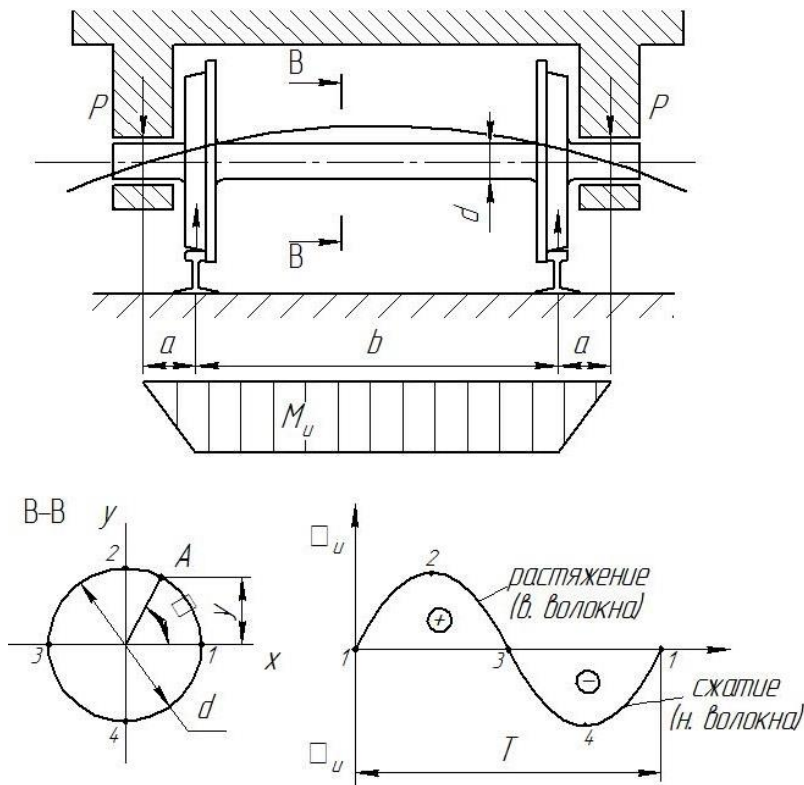


Рис. 5 Механизм нагружения оси железнодорожного вагона

Напряжение в произвольной точке A поперечного сечения оси определяется по формуле:

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{J_x} \cdot y_A = \frac{M_{и}}{J_x} \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin\varphi,$$

J_x , $M_{и}$ – соответственно момент инерции и изгибающий момент поперечного сечения оси.

При равномерном вращении $\varphi = \omega \cdot t$, и тогда

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{J_x} \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin\omega \cdot t.$$

Механизм разрушения вагонной оси был раскрыт в начале прошлого столетия. Многочисленные исследования показали, что при действии переменных напряжений на поверхности детали появляется микротрещина, постепенно проникающая вглубь. При переменных деформациях края трещины то сближаются и нажимают друг на друга, то расходятся, этим объясняется наличие гладкой, притертой зоны излома. По мере развития микротрещины поперечное сечение детали ослабляется все больше, и, наконец, при случайном толчке или ударе наступает окончательное разрушение.

Таким образом, *под усталостью понимается процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных*

напряжений, приводящий к изменению его свойств, образованию и развитию трещин и к разрушению.

Характер изменения напряжений в деталях машин может быть неустановившимся (например, изменение напряжений в детали пролетного сооружения моста при движении по нему трамваев, автомобилей, пешеходов) и установившемся (например, вагонная ось, валы редукторов и т.д.).

Основные характеристики циклов

1. $\sigma_{max} (\sigma_{min})$, $\tau_{max} (\tau_{min})$ – максимально и минимальное по алгебраической величине соответственно нормальное и касательное напряжения цикла.

2. $\sigma_m (\tau_m)$, среднее напряжение цикла.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2};$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}.$$

3. $\sigma_a (\tau_a)$ – амплитудное напряжение цикла;

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2};$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2}.$$

4. R – коэффициент асимметрии цикла.

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}};$$

$$R_\tau = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}.$$

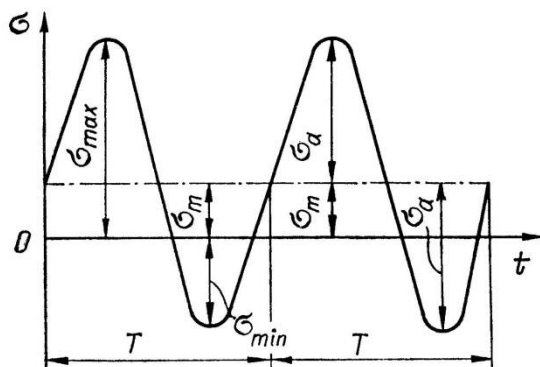


Рис. 6 Схема цикла напряжений

Из рис. 6 следует:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a;$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a.$$

Циклы нагружения

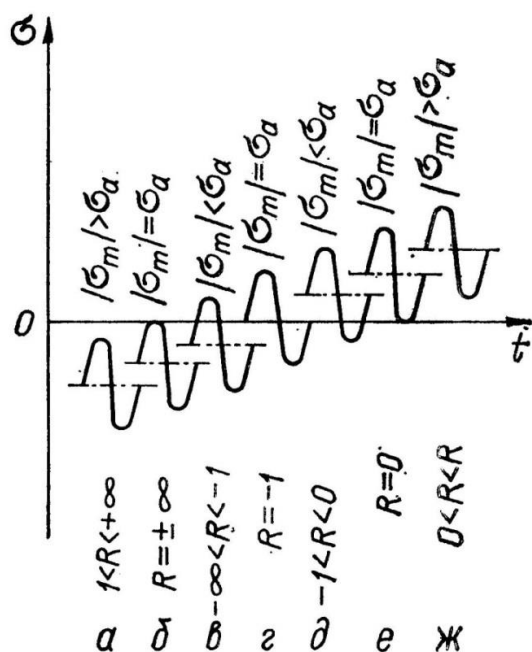


Рис. 7 Циклы напряжений и соответствующие им значения коэффициента асимметрии[1]:

а, ж – знакопостоянные циклы; *б, е* – пульсирующие циклы; *в, д* – знакопеременные циклы; *з* – симметричный цикл

1. *Симметричный цикл* (σ_{-1}) (рис. 7з):

$$\sigma_{max} = \sigma; \sigma_{min} = -\sigma;$$

$$\sigma_m = 0; \sigma_a = \sigma; R = -1.$$

2. *Пульсирующий цикл (отнулевой)* (σ_0) (рис. 7б, 7е):

$$\sigma_{max} = \sigma; \sigma_{min} = 0;$$

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_0}{2}; R = 0.$$

3. *Знакопостоянные циклы* (рис. 7а, 7ж):+

$$0 < R < 1, \text{ либо } R > 1$$

4. *Знакопеременные циклы* (рис. 7в, 7д):

$$1 < R < 0, \text{ либо } -1 < R < 0$$

5. *«Постоянный» цикл* (рис. 2):

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_m; \sigma_a = 0; R = 1.$$

Пределы выносливости (опытные соотношения) [2]

Как показывает опыт, постепенно развивающаяся трещина возникает только при переменных напряжениях, колеблющихся систематически между двумя крайними значениями.

Известно также, что большое количество деталей машин и конструкций выдерживают переменные напряжения в течение весьма продолжительного срока, если напряжения в них остаются в определенных границах.

Итак, трещина усталости возникает тогда, когда действительная величина наибольшего колеблющегося напряжения превзошла *предел усталости* или *предел выносливости*.

Предел выносливости – максимальная амплитуда напряжения, которое образец выдерживает без разрушения, базовое число циклов нагружения $N_{баз}$ ($N_{баз} \cong 10^6 - 10^7$). Предел выносливости определяется экспериментально. А затем по результатам испытаний строят кривые усталости. На оси абсцисс откладывают число циклов N , а на оси ординат – экспериментально найденное максимальное напряжение σ , соответствующее этим числам циклов. Ордината горизонтального участка кривой усталости является пределом выносливости. Кривые усталости (*кривые Веллера*) строят в координатах $\sigma - N$, $\sigma - \lg N$, $\lg \sigma - \lg N$.

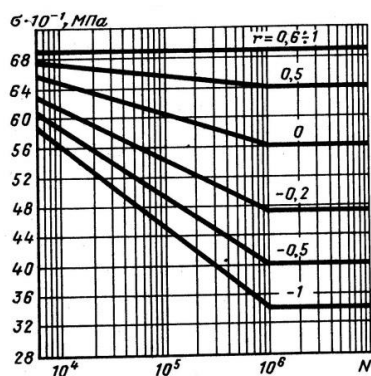


Рис.8 Кривые усталости в координатах $\sigma - \lg N$

Предел выносливости большинства конструкционных сталей определяют при $N_\delta \cong 10^6 - 10^7$ циклов. Эти значения берут за базу испытаний N_δ – предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость. Для цветных металлов (медь, алюминий) база испытаний в $5 \div 10$ раз больше, чем для черных металлов. В таких случаях определяют предел ограниченной выносливости, как напряжение не вызывающее разрушение образца при определенном числе циклов ($N_{ц} \cong 5 \cdot 10^7$).

На участке кривой $N_i < N_\delta$ справедлива приближенная зависимость $\sigma_i^m \cdot N_i = \sigma_R^m \cdot N_\delta = const$.

Если требуемая долговечность детали ограничена числом циклов меньше N_δ , то при расчетах пользуются пределом выносливости соответствующим заданному числу циклов N_i :

$$\sigma_i^m = \frac{(\sigma_R^m \cdot N_\delta)}{N_i}; \sigma_i = \sigma_R \cdot \sqrt[m]{\frac{N_\delta}{N_i}} = \sigma_R \cdot K_L.$$

где K_L – коэффициент, учитывающий режим и длительность работы детали;

m – зависит от формы детали, механических характеристик, вида напряженного состояния, термообработки; $m \cong 6 \div 9$.

Механизм появления и развития трещин усталости

При действии высоких местных напряжений, вызванных каким-либо концентратором и значительно превышающем предел текучести материала σ_T , в отдельных кристаллических зернах начинаются сдвиги, подобные сдвигам и при статическом нагружении. Разница заключается лишь в том, что при растяжении образца пластические деформации и явления сдвига в кристаллических зернах вызываются общими напряжениями, охватывают весь объем образца и растут в одном направлении. Предельные же нагрузки вызывают деформацию в пределах очень маленького объема, того, который подвергается местным напряжениям и происходят то в одном, то в противоположном направлениях. Поэтому они не оказывают заметного влияния на прочность образца в целом, но та часть образца, которая подвергается высоким местным напряжениям, проходит все стадии пластической деформации, которые испытывает материал всего образца, подвергающегося простому растяжению.

При каждом цикле изменения нагрузок, часть материала, попавшая в зону высоких местных напряжений, испытывает сдвиги то в одном, то в другом направлениях; каждый новый сдвиг происходит в другой плоскости, чем предыдущий, так как эти сдвиги сопровождаются упрочнением материала.

По мере упрочнения пластически деформированный объем все более приближается к упругому, окружающему его материалу, и поэтому берет на себя все большую долю нагрузки. Это вызывает рост фактически максимальных напряжений в рассматриваемом малом объеме материала при постоянном среднем напряжении. В это же время разгружается упругая зона, что влечет за собой уменьшение её деформации.

Таким образом, при переменных нагрузках, происходит постепенный рост наибольших напряжений перенапряженного объема материала. Если эти напряжения достигают критического значения, возникает начальная трещина, у которой процесс повторяется, вызывая её дальнейший рост.

При подготовке лекции были использованы материалы:

1. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов. Справочник в 2-х т. - Киев, Изд-во «Наукова думка», 1987. – Том 1, 512 с., ил.
2. Орлов П.И. Основы конструирования. Справочник в 2-х т. - М., «Машиностроение», 1988. – Том 1, 560 с., ил.