

Глава 8. Сопротивление материалов многократно повторяющимся переменным напряжениям (циклическая прочность).

8.1. Основные понятия

Напряжения, действующие во многих элементах конструкции машин, многократно циклически повторяются.

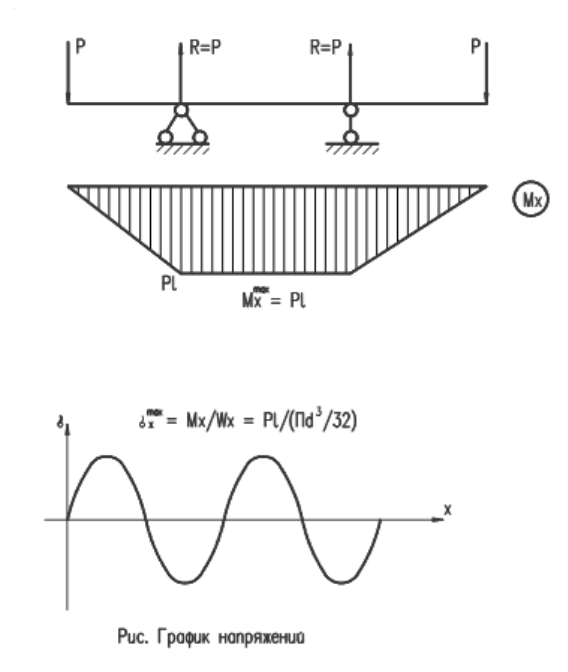


Рис. 8.1

Для точек на поверхности оси ж/д вагона: $\sigma = \sigma^{\max} \sin \omega t$

Явление накопления повреждений при циклическом изменении напряжений называют **усталостью материала**. С ростом числа циклов количество повреждений увеличивается, возникает и растет трещина, что приводит к разрушению. Разрушение, вызванное действием циклически повторяющихся напряжений, называют **усталостным разрушением**.

Способность материала сопротивляться действию циклических напряжений называют **выносливостью**.

Цикл напряжений имеет следующие характеристики:

- амплитуда:

$$\sigma_a = \frac{\sigma^{\max} - \sigma^{\min}}{2}$$

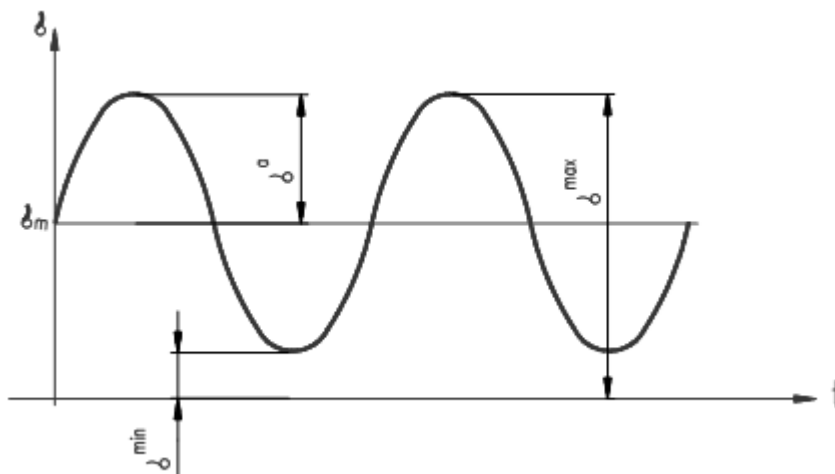


Рис. 8.2 Характеристики цикла напряжений

- среднее напряжение цикла:

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

- коэффициент асимметрии цикла:

$$r = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

Симметричный цикл $r=-1$ - наиболее опасный. Количество циклов, которое способен материал выдержать до разрушения, возрастает с уменьшением амплитуды цикла. График, устанавливающий связь амплитуды напряжений симметричного цикла с количеством циклов до разрушения N , называют **диаграммой усталости** или **кривой Вёлера**.

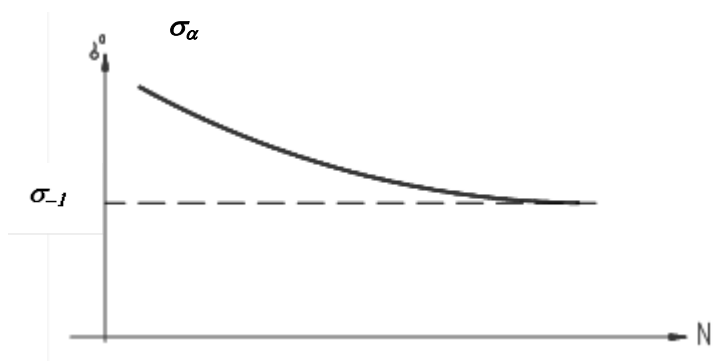


Рис. 8.2 Диаграмма усталости

Максимальное напряжение, которое материал способен выдержать, не разрушаясь при произвольно большом числе симметричных циклов, называют **пределом выносливости** (пределом усталости) (σ_{-1}). В испытаниях σ_{-1} определяется при заданном числе

циклов. Число циклов, при котором диаграмма усталости (кривая Вёлера) становится практически параллельной оси N , называют **базой испытаний**. Для сталей предел усталости устанавливается на базе 10^7 циклов.

Для сталей: $\sigma_{-1} = (0.4-0.5) \sigma_B$

Нестационарное нагружение – циклическое нагружение с переменной амплитудой.

Накопленное повреждение: $\frac{n_i}{N_i}$, где N_i – число циклов до разрушения для данной амплитуды σ_{ai} в соответствии с диаграммой Вёлера; n_i – фактическое количество циклов действия напряжений с амплитудой σ_{ai} .

Гипотеза линейного суммирования повреждений: циклическая прочность обеспечена, если сумма накопленных повреждений при всех k действовавших напряжениях с амплитудами σ_{ai} не превышает единицу:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (8.1)$$

Установлено, что среднее сжимающее напряжение повышает, а среднее растягивающее напряжение понижает циклическую прочность.

Для учета асимметрии цикла строят диаграмму амплитуд, соответствующую пределу выносливости при различных величинах средних напряжений цикла.

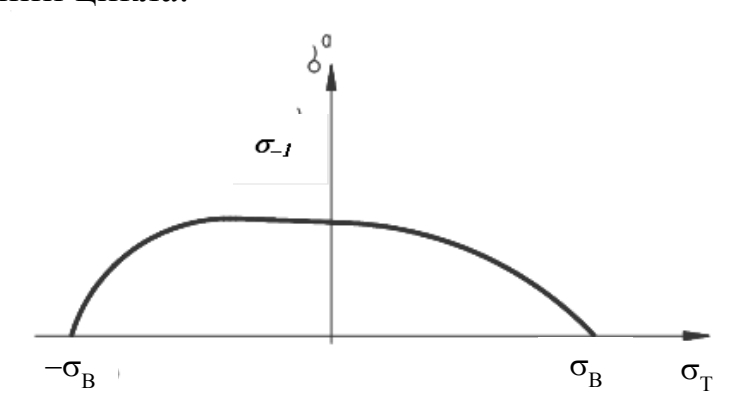


Рис. 8.2 Диаграмма амплитуд

8.2. Влияние конструктивно-технологических факторов на предел выносливости.

а) **Концентрация напряжений** - явление интенсивного увеличения напряжений в упругом теле в районах резкого изменения его формы, называемых концентраторами.

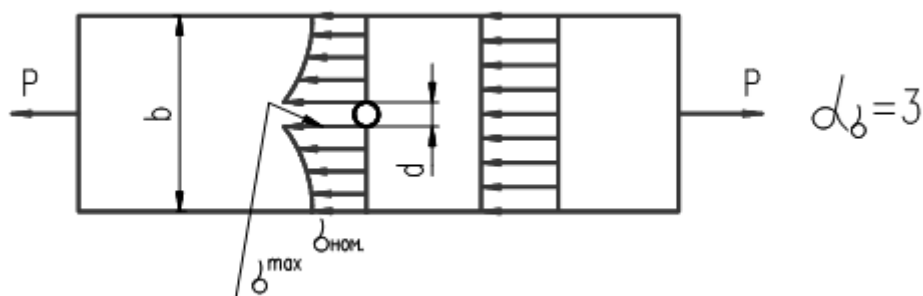


Рис. 8.3

Номинальные напряжения:

$$\sigma_{ном} = \frac{N_z}{A} = \frac{P}{A}$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{max} = \alpha_0 \sigma_{ном}$$

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ном}} \quad (8.2)$$

α_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений, величина которого определяется методами теории упругости.

Для эллиптического выреза с $\frac{c}{d} < 1$:

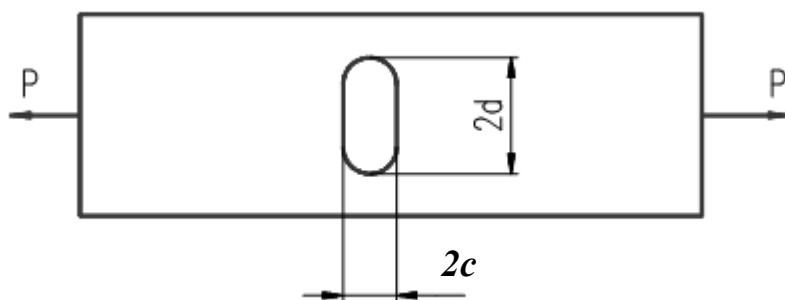


Рис. 8.4

$$\alpha_\sigma = 1 + 2 \frac{d}{c}$$

Зная $\sigma_{\text{ном}}$ и α_σ можно было бы найти σ_{max} и по диаграмме усталости определить количество циклов до разрушения, однако α_σ не учитывает чувствительность данного материала к концентрации напряжения. Поэтому для каждого материала экспериментально определяют эффективный коэффициент концентрации:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}} \quad (8.3)$$

σ_{-1} - предел выносливости гладкого образца

σ_{-1K} - предел выносливости образца с концентратором

$K_\sigma = 1 \dots 3$ и более в зависимости от материала и типа концентратора.

б) Механические характеристики материала

Опыт показывает, что отношение $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_s}$ уменьшается с ростом σ_s .

$\sigma_s, \text{Mпа}$	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_s}$
250...600	0.5 ± 0.05
600...1200	0.4 ± 0.05
1200...1600	0.35 ± 0.05

Материалы с большим σ_s , как правило, обладают малой способностью пластически деформироваться. В высокопластичных материалах с малым σ_s в районах концентраторов могут иметь место пластические деформации, не приводящие к разрушению, что повышает их циклическую прочность.

в) Масштаб.

С увеличением размера образцов σ_{-1} уменьшается. Причиной считается более быстрое уменьшение напряжений (при удалении от концентратора) для малых образцов и уменьшение числа дефектов материала, попадающих в зону больших напряжений.

г) Влияние среды.

Поверхностно-активные и агрессивные среды снижают циклическую прочность и в ряде случаев приводят к исчезновению предела выносливости.

д) Влияние поверхностного слоя.

Наибольшая величина σ_{-1} имеет место для образцов со шлифованной и полированной поверхностями. При более грубой обработке σ_{-1} снижается.

Упрочнение поверхностного слоя путем цементации, азотирования или дробеструйной обработки повышает циклическую прочность металла. Для стали с цементированным поверхностным слоем можно добиться увеличения σ_{-1} на 60%. Создание мягкого поверхностного слоя (обезуглероживание) уменьшает σ_{-1} .