

Лекция № 7

08.05.2020г.

Прочность при циклических нагрузках. Основные понятия об усталости и выносливости.

Большинство деталей машин и механизмов работают в условиях переменных напряжений.

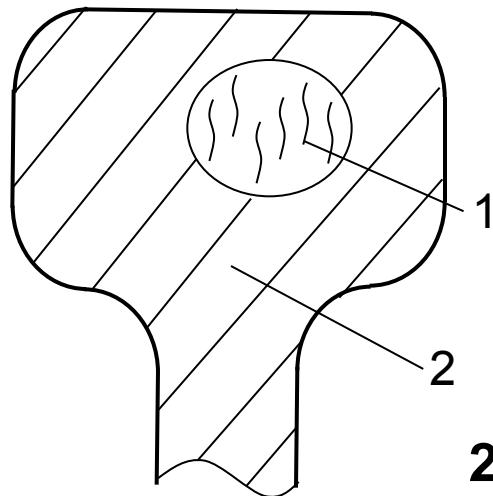
Опыт и анализ поломок показывает, что их разрушения происходят при напряжениях, значительно меньших, чем σ_B , а в ряде случаев и σ_T . Также снижается срок их службы, по сравнению с конструкциями, работающими в статическом режиме нагружения.

Процесс разрушения начинается с появления микротрещины, которая со временем растет.

Под влиянием переменных напряжений края трещины попеременно расходятся и сходятся, надавливая друг на друга и шлифуя поверхности.

**С ростом трещины уменьшается площадь поперечного сечения детали, а напряжения увеличиваются до определенного предела после чего деталь внезапно разрушается (происходит долом).
Такое разрушение называется усталостным.**

Усталость – это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению.



Усталостное разрушение рельса.
Внешний вид излома в поперечном сечении.

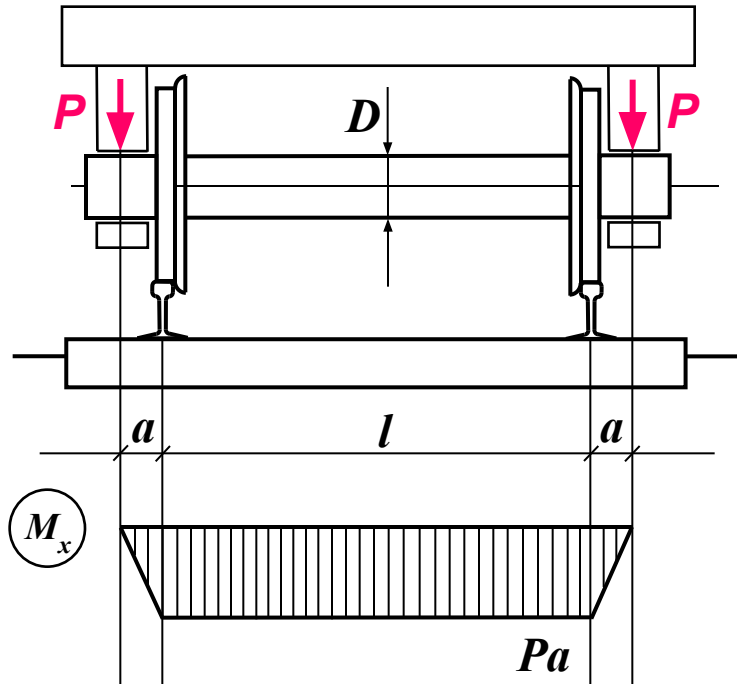
- 1 - шероховатая поверхность (вязкое разрушение).
- 2 - блестящая (притертая) поверхность (хрупкое разрушение).

Выносливость – это способность материала сопротивляться разрушению при многократном действии переменных напряжений.

Предел выносливости – это максимальное напряжение, которое может выдержать материал, не разрушаясь при повторно-переменном нагружении.

Обозначение: σ_{-1} - при симметричном цикле.

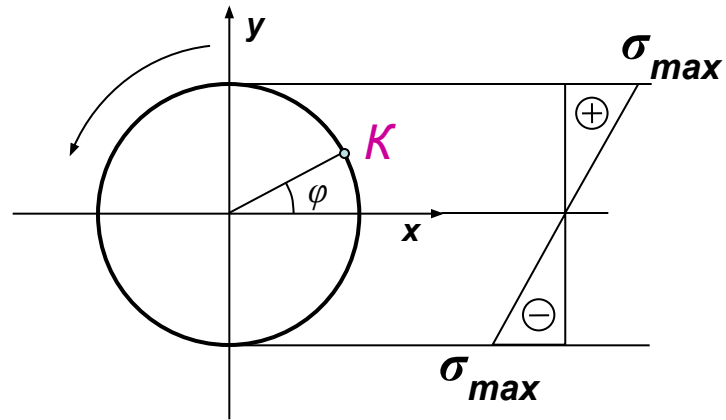
Рассмотрим ось железнодорожного вагона.



На участке l ось испытывает чистый изгиб:

$$M_x = Pa = const$$

Рассмотрим поперечное сечение оси.



Выберем в поперечном сечении оси некоторую точку K .

Напряжения при изгибе определяют по формуле Навье: $\sigma = \frac{M_x}{I_x} y$

при этом $0 \leq y \leq \frac{D}{2}$ в зависимости от положения точки K .

Следовательно, для любого ее положения имеем: $y = \frac{D}{2} \sin\varphi$

При равномерном вращении $\varphi = \omega t$, где:

ω - угловая скорость вращения оси;

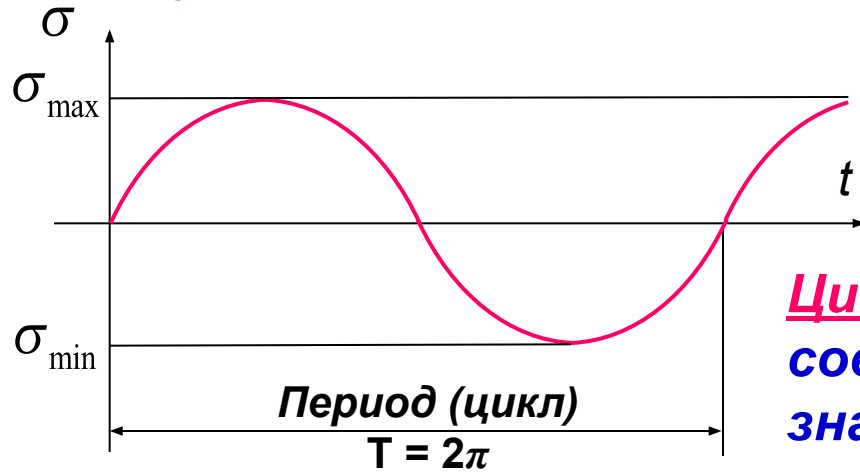
t - время.

Тогда: $y = \frac{D}{2} \text{Sin}\omega t$

Следовательно: $\sigma_K = \frac{M_x}{I_x} \cdot \frac{D}{2} \cdot \text{Sin}\omega t$

Или: $\sigma_K = \sigma_{max} \cdot \text{Sin}\omega t$

В этом случае напряжения при переменном нагружении меняются по синусоиде.



Точка K находится попеременно то в растянутой, то в сжатой области.

Циклом напряжений называется совокупность их последовательных значений за один период.

Характеристики цикла:

σ_{max} - максимальное напряжение;

σ_{min} - минимальное напряжение;

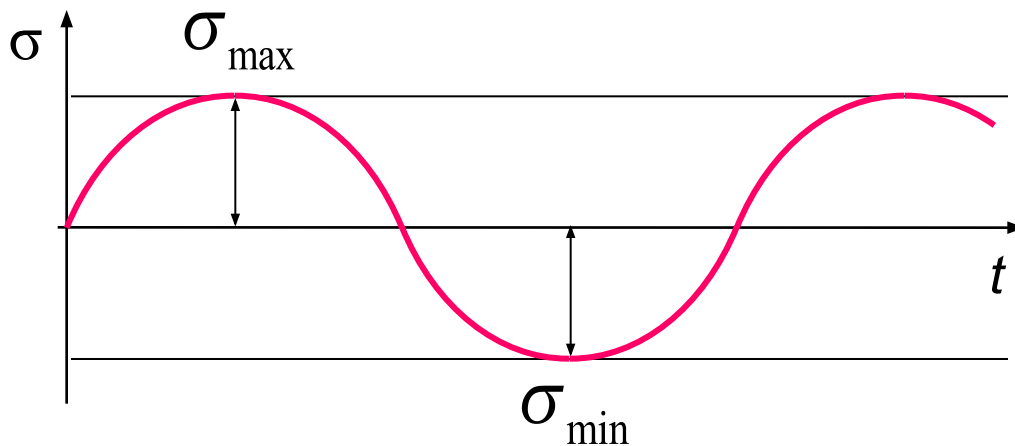
$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ - коэффициент асимметрии цикла.

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

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

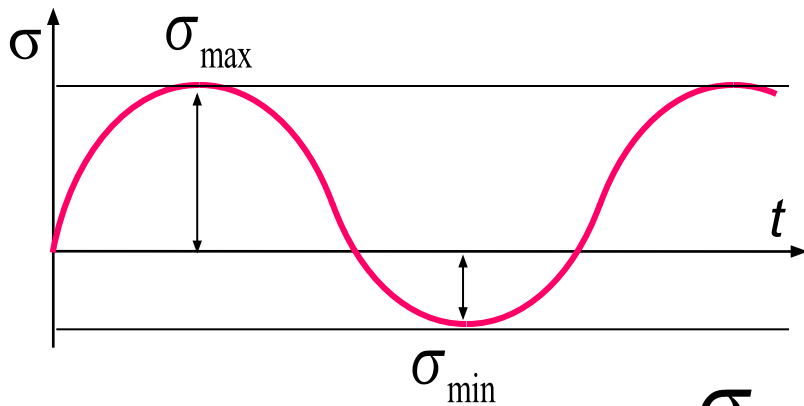
Классификация циклов.

а) Симметричный цикл (наиболее опасный).



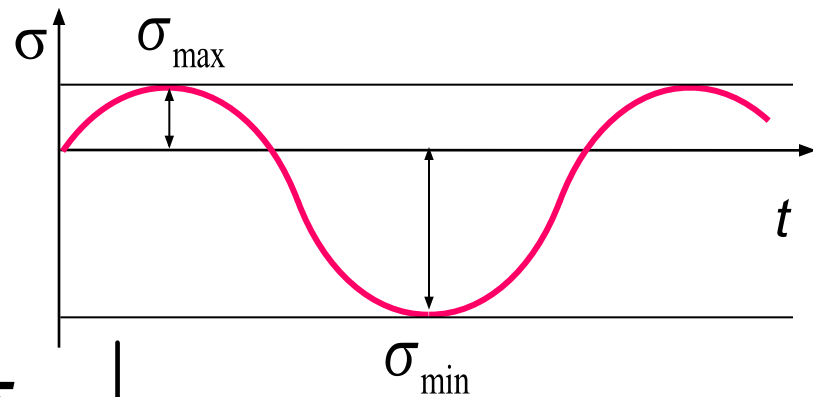
$$\sigma_{max} = |\sigma_{min}|$$
$$R = -1$$

б) Несимметричные циклы (знакопеременные).



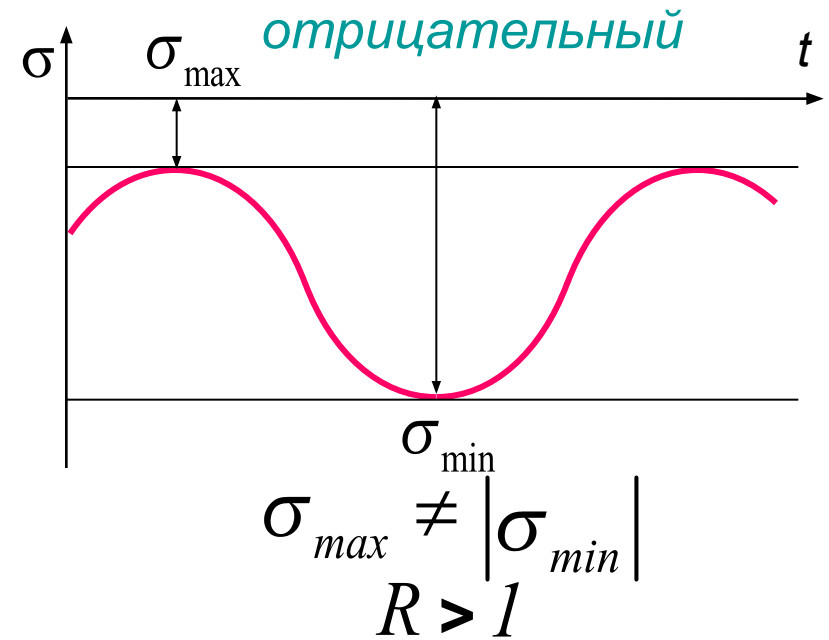
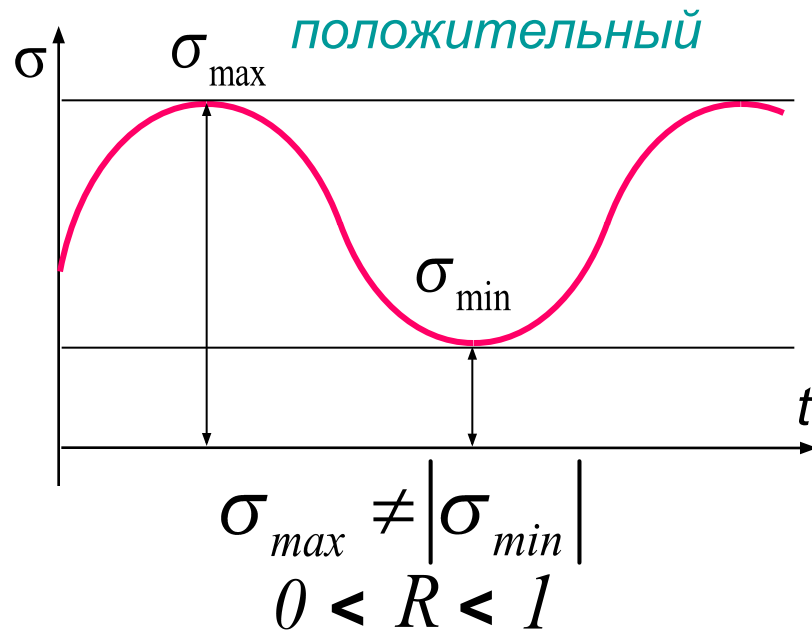
$$-1 < R < 0$$

$$\sigma_{max} \neq |\sigma_{min}|$$

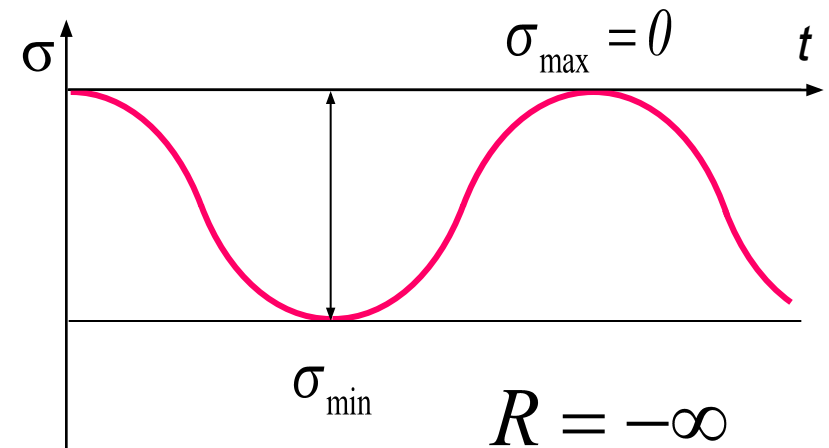
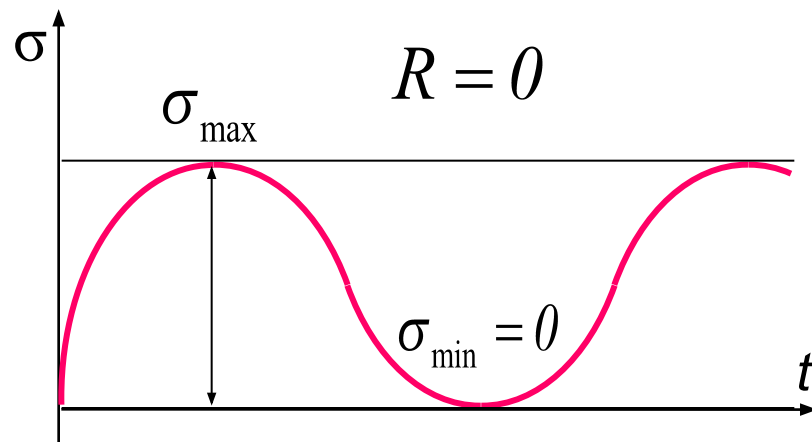


$$R < -1$$

в) Несимметричные циклы (знакопостоянные).

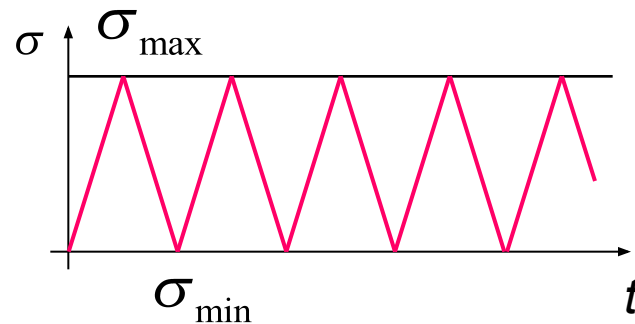
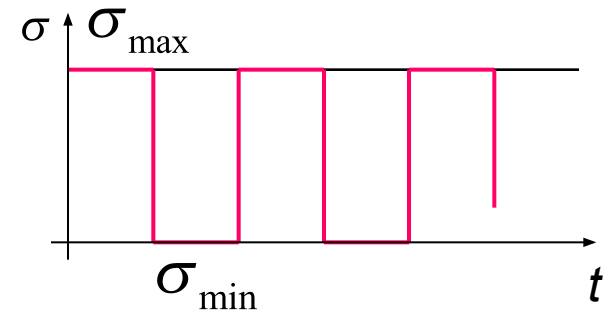
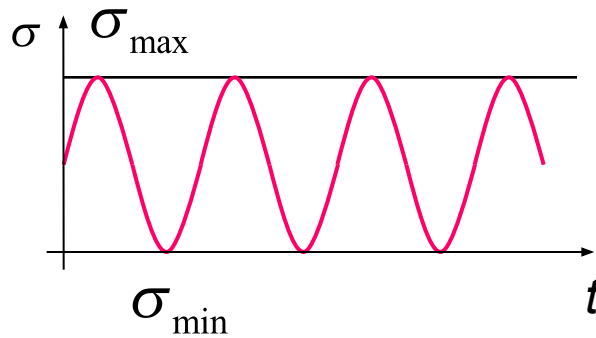


г) Пульсационные циклы (отнулевые).



Циклы, имеющие одинаковые коэффициенты асимметрии, называются подобными.

Экспериментально установлено, что закон изменения напряжений во времени не оказывает влияния на прочность детали, существенны лишь значения σ_{max} и σ_{min} .



Циклы с одинаковыми значениями σ_{max} и σ_{min} , называются равноценными.

Методы определения предела выносливости.

Наиболее распространенными усталостными испытаниями являются испытания в условиях симметричного цикла.

Используется принцип чистого изгиба вращающегося образца.

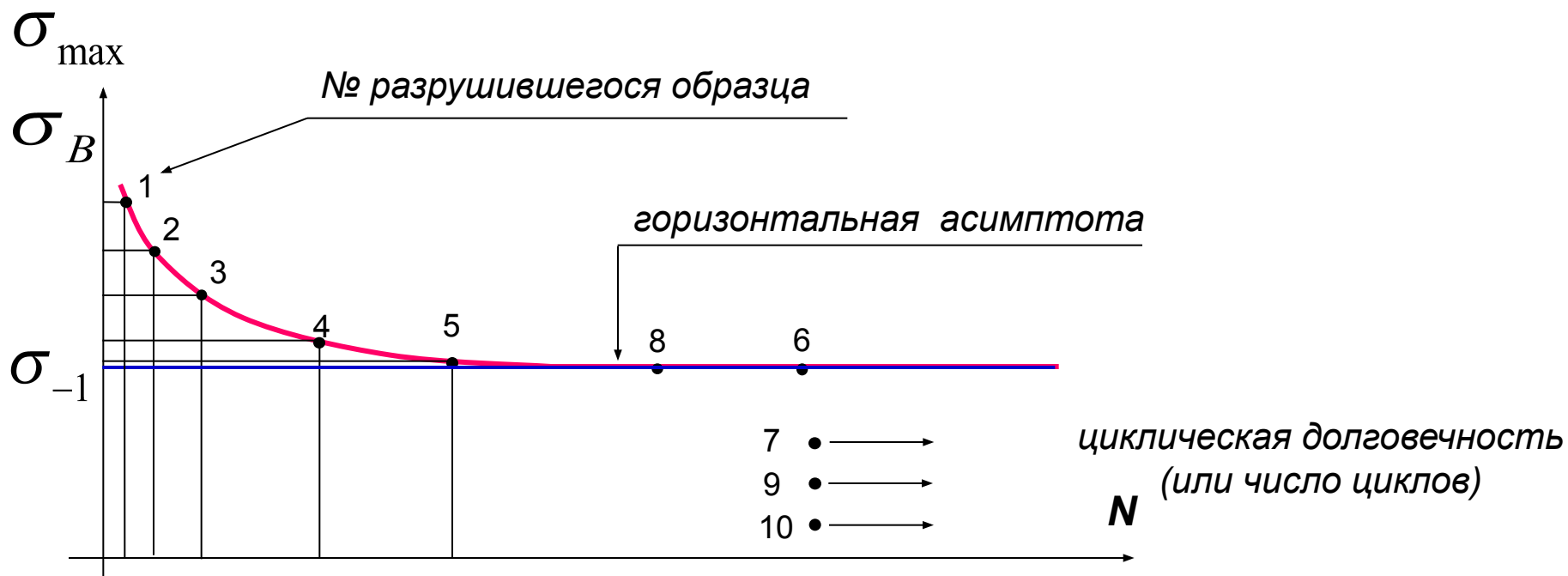
Образцы цилиндрические $\varnothing 7\div 10$ мм.

Обычно используют партию образцов количеством не менее 10 шт.

В следующих образцах максимальное напряжение уменьшают и всякий раз фиксируют число циклов нагружения (с помощью счетчика оборотов), которое выдержал образец до разрушения.

По мере снижения напряжения, образцы выдерживают до разрушения все большее число циклов.

По результатам испытаний строится кривая Вёллера (для стали).



Число циклов, до которого ведется испытание, называется базой испытания.

Базовое число циклов для стали и чугуна $N = 10^7$.

Опыт показывает, что если стальной образец не разрушается при $t = 20^\circ\text{C}$ до 10^7 циклов (≈ 54 часа при 3000 об/мин), то он не разрушится и при более длительном испытании.

Пример: вагонная ось на пути от Москвы до Владивостока испытывает около $3 \cdot 10^6$ циклов.

Кривые выносливости цветных металлов не имеют горизонтальных асимптот, поэтому для них база испытания увеличивается до $N = 10^8$.

Пределы выносливости при циклических изгибных нагрузках:

- для сталей: $\sigma_{-1} \approx (0,4 \div 0,5)\sigma_B$
- для цветных металлов: $\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,5)\sigma_B$

Пределы выносливости при циклических крутильных нагрузках:

- для сталей: $\tau_{-1} \approx 0,6\sigma_{-1}$
- для хрупких материалов: $\tau_{-1} \approx 0,8\sigma_{-1}$

Основные факторы, влияющие на предел выносливости.

- **концентраторы напряжений (отверстия, выточки, шпоночные канавки, резкие изменения геометрии формы);**
- **состояние поверхности детали;**
- **форма и размеры детали;**
- **коррозия металлов.**

Все перечисленные факторы ведут к снижению предела выносливости, которое учитывается различными коэффициентами.

Наличие концентраторов напряжений.

а) **теоретический коэффициент концентрации напряжений** (учитывает местные напряжения):

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{НОМ}}}$$

или

$$\alpha_{\tau} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{НОМ}}}$$

где:

σ_{\max} и τ_{\max} - наибольшие местные напряжения;

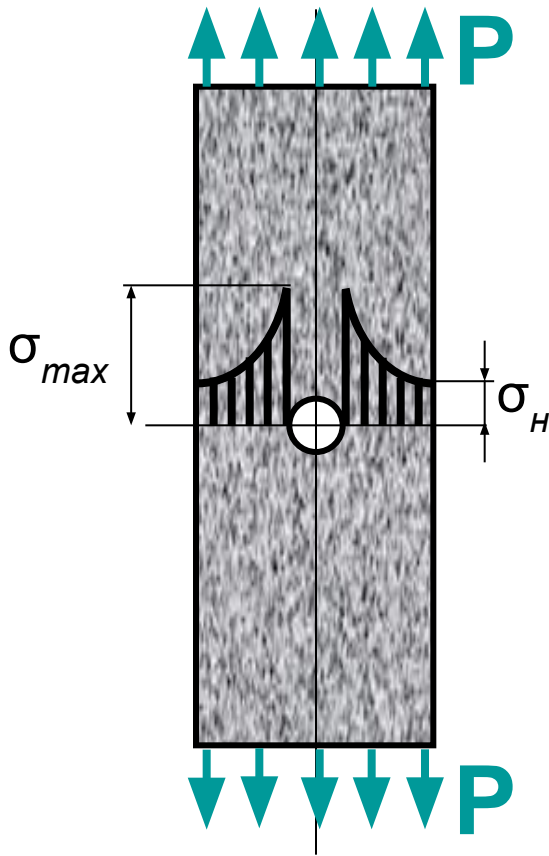
$\sigma_{\text{НОМ}}$ и $\tau_{\text{НОМ}}$ - номинальные напряжения, не учитывающие эффекта концентрации, их определяют в наиболее ослабленном сечении.

$$\sigma_{\text{НОМ}} = \frac{N}{F_{\min}}$$

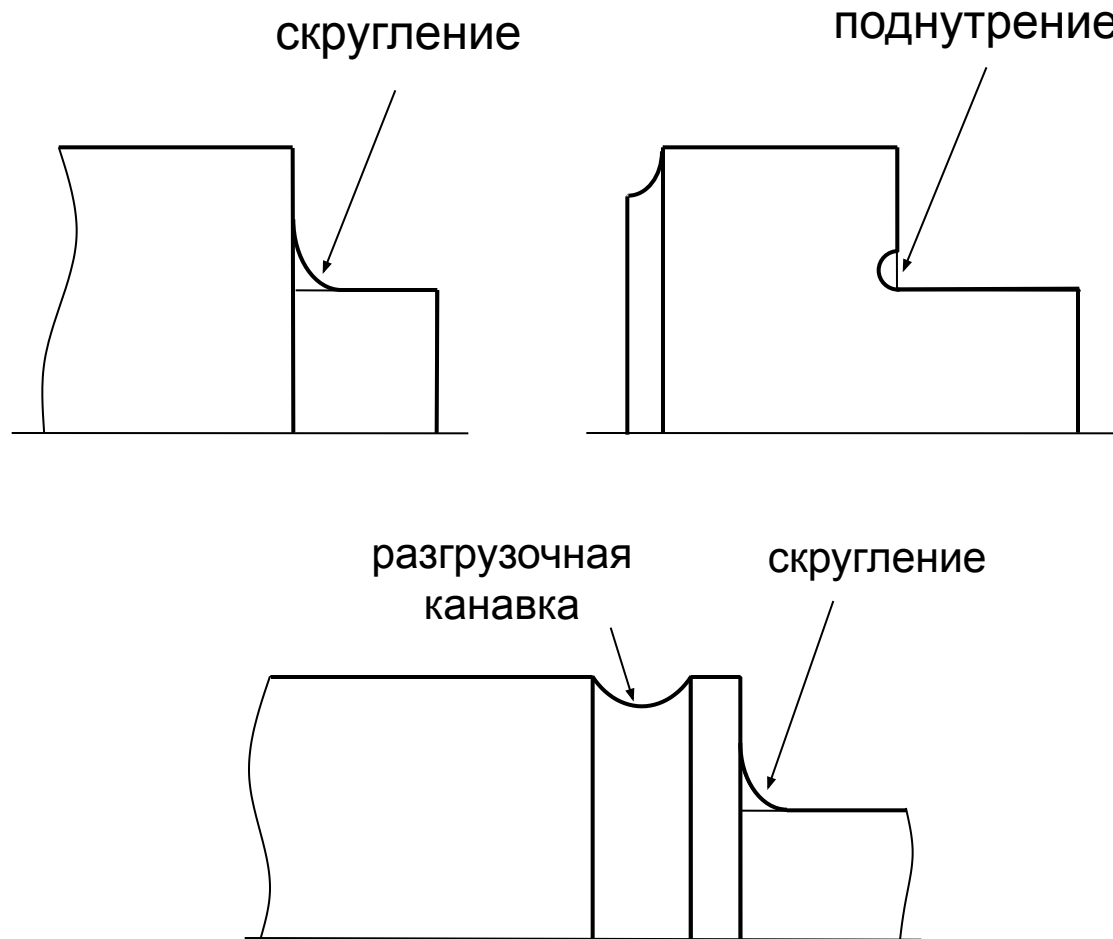
где:

N - нормальная сила;

F_{\min} - площадь ослабленного (нетто-) сечения.



Для снижения местных напряжений скругляют острые углы пересечения поверхностей (формируют галтели) или протачивают разгрузочные канавки или поднутрения.



б) эффективный коэффициент концентрации напряжений:

$$\boxed{k_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}}} \quad \text{или} \quad \boxed{k_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1k}}} \quad \text{где:}$$

σ_{-1} и τ_{-1} - пределы выносливости гладких образцов;

σ_{-1k} и τ_{-1k} - пределы выносливости образцов с концентраторами напряжений.

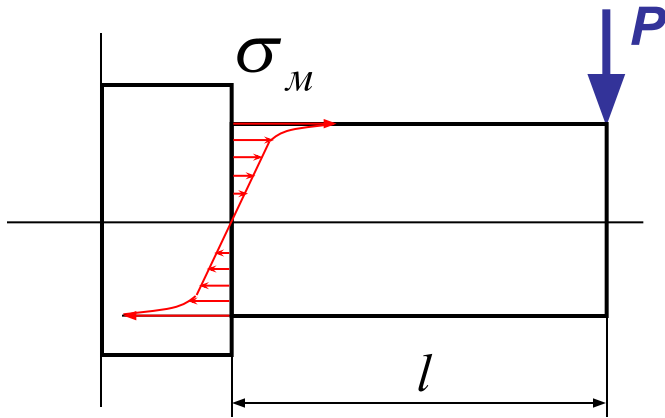
Размеры гладких и негладких образцов одинаковы.

в) коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений:

$$\boxed{q = \frac{k_{\sigma} - 1}{\alpha_{\sigma} - 1}} \quad \text{или} \quad \boxed{q = \frac{k_{\tau} - 1}{\alpha_{\tau} - 1}} \quad \text{где:}$$

q - справочная величина, различная для различных материалов.

**Вал со ступенчатым изменением диаметра
(угловой концентратор напряжений).**

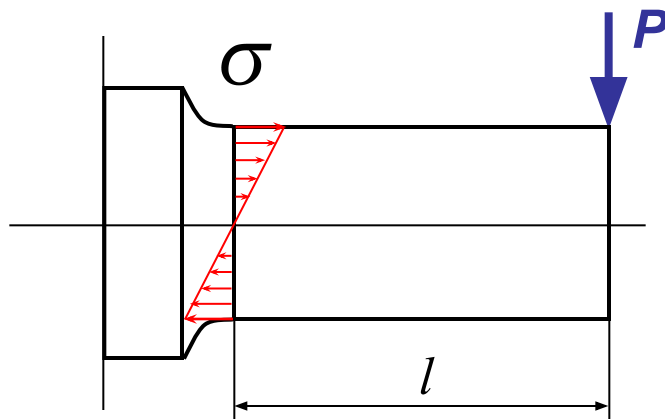


$$\sigma_m = \alpha_k \frac{Pl}{W} - \text{местные напряжения.}$$

α_k - коэффициент
концентрации напряжений.

$$\alpha_k > 1$$

Вал со скруглением, плавное изменение диаметра.



$$\sigma = \frac{Pl}{W}$$

**Местной концентрации
напряжений нет.**

Состояние поверхности деталей.

Низкое качество обработки поверхности детали снижает предел выносливости.

Коэффициент качества поверхности:

$$k_f \leq 1$$

$$k_f = \frac{\sigma'_{-1}}{\sigma_{-1П}}$$

где: σ'_{-1} - предел выносливости шероховатого образца;

$\sigma_{-1П}$ - предел выносливости полированного образца.

Для улучшения состояния поверхности деталей применяют:

- азотирование;
- цементацию;
- поверхностную закалку токами высокой частоты (ТВЧ);
- дробеструйную обдувку;
- наклеп поверхностного слоя обкаткой роликами.

Форма и размеры деталей. Масштабный фактор.

Предел выносливости (усталостная прочность) детали снижается с увеличением площади ее поперечного сечения.

Коэффициент масштабного фактора:

$$\boxed{\varepsilon_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1d_0}}} \quad \text{или} \quad \boxed{\varepsilon_{\tau} = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1d_0}}} \quad \text{где:}$$

σ_{-1d} и τ_{-1d} - пределы выносливости рассматриваемой детали;

σ_{-1d_0} и τ_{-1d_0} - пределы выносливости лабораторного образца диаметром $d_0 = 7 \div 10$ мм;

$$d_0 > d$$

Причины проявления масштабного фактора:

- ***статистический фактор***

большая вероятность проявления дефектов и перенапряженных зерен структуры материала;

- ***производственный фактор***

ухудшение качества материала в увеличением объема детали;

- ***технологический фактор***

влияние способа обработки детали в процессе ее изготовления.

Коррозия металлов.

Резко снижается предел выносливости из-за наличия коррозионно-усталостных и стресс-коррозионных (внутрикристаллических) трещин в поверхностном слое металла.

Они являются концентраторами напряжений. Напряжения максимальны в вершине трещины.



Сетка стресс-коррозионных трещин

Помимо сетки стресс-коррозионных трещин на теле трубы имеются каверны и язвы, они тоже могут служить инициаторами начала стресс-коррозионных процессов.

Колония трещин



Магистральная трещина



Для снижения коррозии применяют антикоррозионную защиту (активную и пассивную). Активная – ЭХЗ, СКЗ.

Пассивная – изоляционные покрытия (армированный металлической сеткой битум, защитные пленки на основе полиэтилена и др.), покраска.

Расчеты на прочность при циклическом нагружении.

В большинстве случаев расчеты на прочность деталей, работающих при переменных напряжениях, выполняют как проверочные.

Условие прочности:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ном \max}}$$

- коэффициент запаса прочности

$$n \geq [n]$$

где: $[n] = 1,4 \div 3,0$