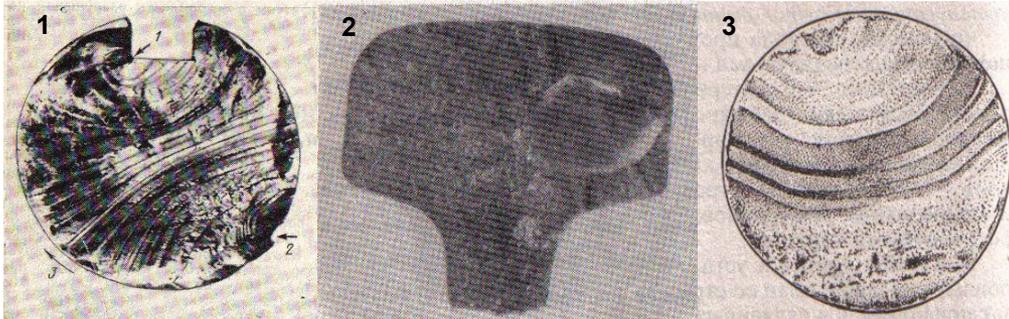


Лекция 8 Усталостная прочность материалов

- Возникновение и накопление усталостных повреждений** – При действии циклически изменяющихся нагрузок возникающие напряжения, превышающие определенный предел, вызывают образование и накопление повреждений. Этот необратимый процесс приводит к образованию трещины. Концентрация напряжений на краю трещины способствует дальнейшему ее развитию. При достижении длины трещины критического значения скорость продвижения трещины резко возрастает и конструкция разрушается изломом, идентичному хрупкому разрушению, даже при пластичных материалах. Последнее обстоятельство (факт хрупкого разрушения пластичных материалов) дало повод к предположению, что под влиянием переменных напряжений материал со временем постепенно перерождается, как бы “устаёт”.
- Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к образованию трещины и разрушению, называется усталостью.**
- Свойство материала противостоять усталости называется выносливостью.**
- Механизм усталостного разрушения** – Процесс усталостного разрушения связан со **структурной неоднородностью** материала (вариация размеров, формы и расположения отдельных зерен металла, ориентации кристаллографических плоскостей, наличие различных включений, дефекты кристаллической решетки и т.п.). При переменных напряжениях, даже не превосходящих в среднем по некоторой области предела пропорциональности, возникает в отдельных точках с неблагоприятным сочетанием неоднородностей, пластическая деформация – деформация сдвига по некоторым плоскостям под действием *касательных* напряжений с образованием *микротрещин*, которые далее под действием *нормальных* напряжений развиваются и сливаются между собой с образованием *макротрещин*.



Поверхность усталостного излома состоит из двух заметно отличающихся друг от друга зон: зона постепенного развития трещины – имеет гладкую поверхность с полосками, отражающими периоды роста трещины, зона хрупкого излома – имеет крупнозернистое строение.

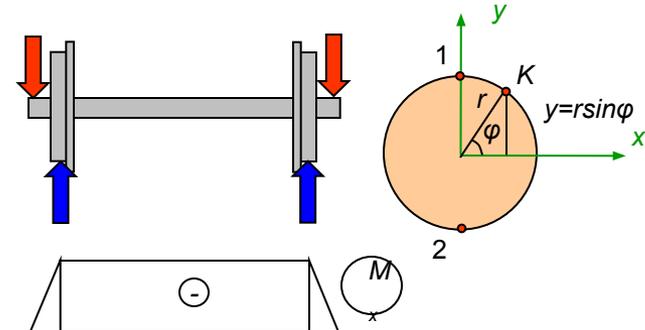
На рис.1 -3 показаны усталостное разрушение различных деталей – вала со шпоночной канавкой (трещина начала расти из левого ее угла), рельса (трещина начала расти на глубине 10 мм), вагонной оси (трещина начала расти из подповерхностного слоя).

- Циклы напряжений и их параметры** – Усталостная прочность материалов при переменных напряжениях зависит от вида напряженного состояния и от характера изменения напряжений в времени.

Определим напряжения в произвольной точке *K* на поверхности вагонной оси, вращающейся с некоторой постоянной угловой скоростью ω_z :

$$\sigma = -\frac{M_x}{I_x} y = -\frac{M_x}{I_x} r \sin \varphi \Rightarrow \sigma = \sigma_a \sin \omega_z t$$

σ_a - максимальные напряжения в точках 1 (-), 2 (+)



знака: в промежутке времени T напряжение принимает одно и то же значение). **Часть**

графика напряжений, соответствующая полному периоду их изменений называется циклом напряжений.

В данном примере цикл *симметричный* ($\sigma_{max} = \sigma_a$, $\sigma_{min} = -\sigma_a$).

- Характеристики циклов напряжений.** График напряжений в произвольной точке K вращающейся вагонной оси показывает периодическое изменение величины (и знака!) во времени с периодом T (через промежуток времени T напряжение принимает одно и то же значение). **Часть графика напряжений, соответствующая полному периоду их изменений называется циклом напряжений.** В данном примере цикл *симметричный* ($\sigma_{max} = \sigma_a$, $\sigma_{min} = -\sigma_a$).

При наличии какой-то постоянной составляющей напряжений, например, при дополнительном осевом сжатии или растяжении или вал имеет дисбаланс (неуравновешенную массу), цикл становится *асимметричным* ($|\sigma_{max}| \neq |\sigma_{min}|$):

Если знаки напряжений σ_{max} и σ_{min} различны, то такой цикл называется *знакопеременным*.

Если знаки напряжений σ_{max} и σ_{min} постоянны, то такой цикл называется *знакопостоянным*.

Если одно из напряжений σ_{max} или σ_{min} равно нулю, то такой цикл называется *отнулевым* или *пульсирующим*.

Среднее напряжение цикла $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$:

Амплитуда напряжений цикла $\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_m = \sigma_m - \sigma_{min} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$.

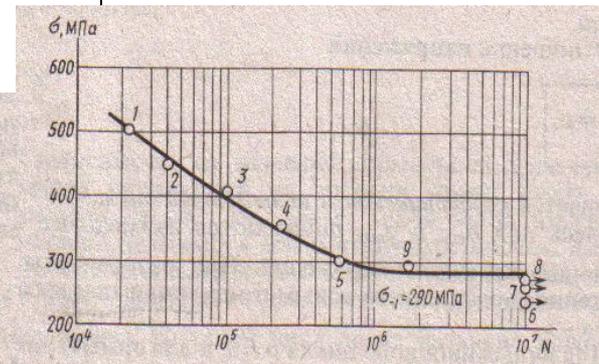
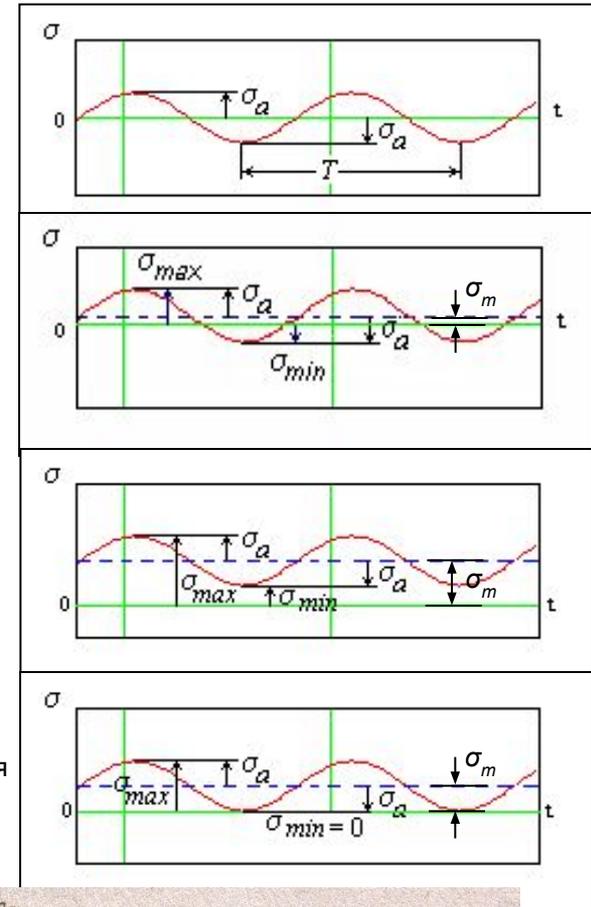
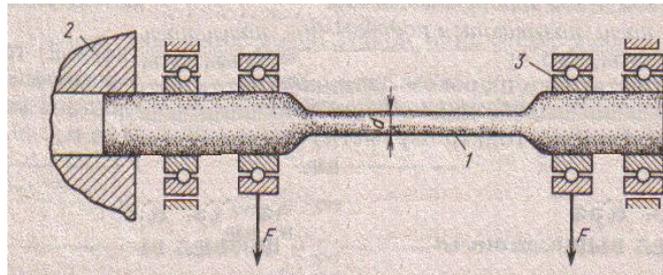
Любой цикл напряжений полностью характеризуется этими двумя параметрами. Однако, асимметричность цикла удобно оценить отношением, называемым *коэффициентом асимметрии цикла*:

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

Циклы, имеющие одинаковые значения коэффициента асимметрии называются подобными.

- Экспериментальное определение предела выносливости.** На настоящем этапе развития науки о прочности нет возможности создать теоретические методы расчета на выносливость. В связи с этим теория усталостной прочности строится на основе экспериментальных данных. В результате большого числа испытаний для различных сталей и видов циклов получают **кривые усталости**. Ее ординаты представляют собой значения максимальных напряжений при которых происходит разрушение детали, а абсцисса – число циклов (N), которое выдержала деталь до разрушения.

Образцы испытываются на специальных машинах в зависимости от вида нагружения. При испытании на изгиб образец 1 закрепляется в патроне 2 шпинделя, передающего вращение, поперечная нагрузка передается с помощью пары подшипников 3, связанных с грузовой траверсой. Счетчик оборотов фиксирует число циклов.



образцов: для получения первой точки (1) задается амплитудное напряжение σ_a

$= 0.65$

$0.75\sigma_a$. При таком достаточно большом напряжении образец разрушается сравнительно

быстро и результат наносится на график:

- **Построение кривой усталости.** Проводятся испытания не менее 10 одинаковых образцов. Для получения первой точки (1) задается амплитудное напряжение $\sigma_a = 0.65 - 0.75\sigma_B$. При таком достаточно большом напряжении образец разрушается сравнительно быстро и результат наносится на график:

Для следующего идентичного образца амплитудное напряжение снижается, образец до своего разрушения работает дольше и полученный результат (точка 2) наносится на график:

Для следующего идентичного образца амплитудное напряжение вновь снижается и все действия повторяются:

Т.к. число циклов растет очень быстро, используется логарифмическая шкала по оси абсцисс. Вместе с этим растет время испытания каждого следующего образца. С этим и связана в первую очередь трудоемкость испытаний на выносливость. В процессе длительных испытаний было установлено, что образцы, неразрушившиеся при $N = 10^7$ циклах, не разрушаются и при большем числе циклов. Собственно на это указывает горизонтальность последних участков кривой, построенной по полученным точкам.

Напряжение σ_r , соответствующее таким участкам, является характеристикой усталостной прочности и называется **пределом выносливости материала**.

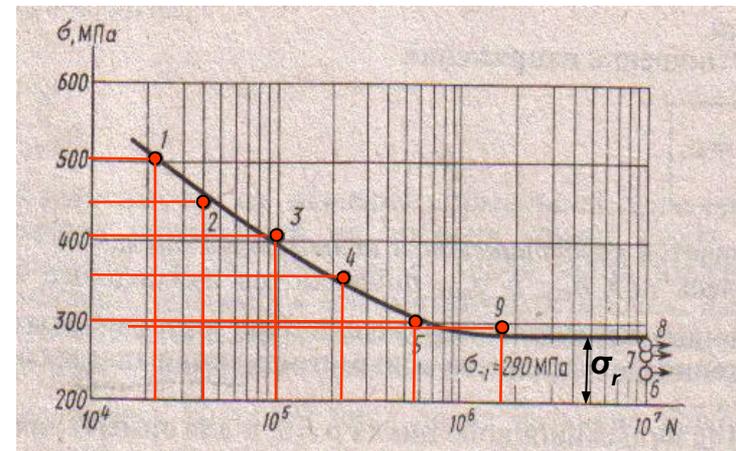
Самым неблагоприятным циклом с точки зрения обеспечения выносливости является *симметричный* цикл. Именно для такого цикла и проводятся чаще всего испытания на выносливость. Полученный предел выносливости для симметричного цикла обозначается как σ_{-1} (коэффициент асимметрии $r = -1$). Эксперименты показывают, что для сталей соотношение между пределом выносливости и пределом прочности составляет:

$$\sigma_{-1} \approx (0.4 - 0.5)\sigma_B$$

При отсутствии данных о пределе выносливости для конкретной марки стали и при невозможности проведения испытаний на усталость можно пользоваться этим соотношением.

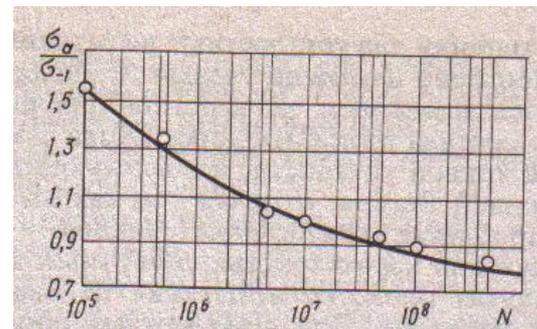
Замечание: Для цветных металлов кривая усталости не имеет горизонтального участка и для них принимается в качестве базового числа $N = 10^8$. Соотношение между пределом выносливости и пределом прочности:

$$\sigma_{-1} \approx (0.25 - 0.5)\sigma_B$$



Число циклов, равное для стали $N = 10^7$, называется **базовым** числом. При достижении числа циклов этого значения испытания прекращаются.

Между прочим, вагонное колесо совершает примерно такое число оборотов (циклов) на пути в 3 раза большем, чем расстояние от Москвы до Владивостока.



используются стандартные образцы цилиндрической формы, диаметром 7-10 мм, имеющие полированную поверхность. Все другие образцы, выполненные из тех же материалов, но отличающиеся от стандартных перечисленными качествами, при испытаниях показывают как правило более низкий предел выносливость.

■ **Факторы, влияющие на усталостную прочность.** Проведенные эксперименты и практика эксплуатации деталей машин показывают, что прочность при переменных напряжениях (предел выносливости) в значительной мере зависит от формы (наличия концентраторов напряжений) и размеров детали, состояния ее поверхности и действия окружающей среды (условия эксплуатации). При испытаниях на выносливость используются стандартные образцы цилиндрической формы, диаметром 7-10 мм, имеющие полированную поверхность. Все другие образцы, выполненные из тех же материалов, но отличающиеся от стандартных перечисленными качествами, при испытаниях показывают как правило более низкий предел выносливость.

■ **Концентрация напряжений** – местное повышение уровня напряжений в местах резкого изменения размеров сечения, около отверстий, выкружек и канавок. Оно оценивается **теоретическим коэффициентом концентрации**, полученным методами теории упругости для каждого из видов концентраторов:

$$k_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{НОМ}}}$$

■ При циклическом изменении нагрузки в области концентрации напряжений зарождается и развивается трещина, которая в дальнейшем приводит к усталостному разрушению. Для каждого из видов концентраторов должны быть проведены соответствующие испытание на выносливость. Практически, вместо этого, влияние концентрации напряжений учитывается введением **эффективного коэффициента концентрации**, определяемым, как отношение предела выносливости стандартного (“гладкого”) образца к пределу выносливости образца с концентратором:

$$k_{\text{Э}} = \frac{\sigma_r}{\sigma_{rk}}$$

Хотя коэффициент $k_{\text{Э}}$ должен определяться для каждого значения коэффициента асимметрии, обычно ограничиваются данными для симметричного цикла:

$$k_{\text{Э}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}}$$

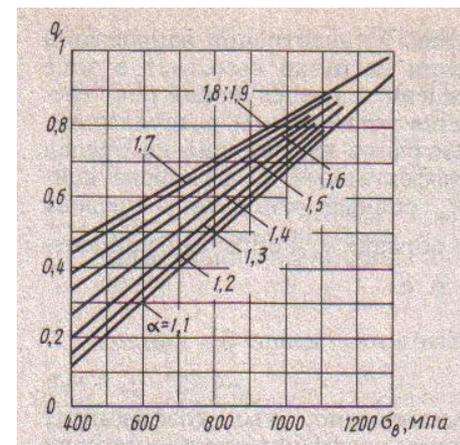
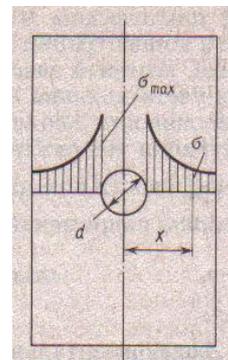
Эффективный коэффициент концентрации меньше теоретического, что объясняется влиянием микропластических деформаций на величину напряжений в зоне развития усталостной трещины. Этот эффект зависит от материала и в общем мало связан с видом концентратора. В связи с трудоемкостью испытаний на усталостную прочность часто эффективный коэффициент концентрации вычисляется при помощи выражения:

$$k_{\text{Э}} = 1 + q(k_T - 1) \quad \text{где } q \text{ — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений.}$$

Коэффициент чувствительности материала q сильно зависит от предела прочности и при больших его значениях (высокопрочные стали) приближается к 1, поэтому применение высокопрочных материалов при переменных нагрузках не всегда целесообразно. На графиках изменения q даны для различных значений α теоретического коэффициента концентрации. Для конструкционных сталей $q \approx 0.6-0.8$. Для чугуна и бетона $q = 0$ и, следовательно, эти материалы не чувствительны к концентрации напряжений. Это объясняется тем, что структура таких материалов крайне неоднородна и вызывает внутреннюю (на уровне структурных составляющих) концентрацию напряжений, превышающую ту, которая создается геометрическими концентраторами, связанными с резким изменением размеров сечения.

■ **Масштабный фактор** – С увеличением площади поперечного сечения при прочих равных условиях усталостная прочность образцов снижается. Причиной этого являются большая вероятность появления дефектов и перенапряженных зерен металла, ухудшение качества металла в связи с увеличением объема поковки, а также проявлением некоторых особенностей технологии обработки. Фактор учитывается введением **масштабного коэффициента** ($\varepsilon < 1$), определяемого как отношение пределов выносливости детали и стандартного образца (d_0):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1d_0}}$$



учитывается введением **коэффициента $\beta < 1$** , определяемого как отношение пределов выносливости рассматриваемого образца и полированного :

Если одновременно учитывается влияние коррозии, то определяется соответствующий коэффициент ($\beta_k < 1$) и перемножается с коэффициентом качества поверхности.

- **Качество поверхности и коррозия** – Эти факторы, влияющие на усталостную прочность, связаны с тем, что состояние поверхности в результате обработки и эксплуатации может быть различным по степени присутствия микроскопических надрезов (обработка резцом), каверн (коррозия), которые провоцируют зарождение и развитие трещин. Естественно, что при повышении качества обработки (чистоты поверхности) усталостная прочность повышается, а при работе деталей в агрессивной среде – снижается. Для повышения усталостной прочности применяют в том числе такие технологические способы упрочнения поверхности, как наклеп поверхностного слоя (обдувка дробью, ультразвук, закалка токами высокой частоты), термоциклирование (электроконтактные технологии), напыление. В целях защиты от коррозии применяют различные антикоррозионные покрытия (окраска). Фактор качества поверхности учитывается введением **коэффициента $\beta < 1$** , определяемого как отношение пределов выносливости рассматриваемого образца и полированного :
Если одновременно учитывается влияние коррозии, то определяется соответствующий коэффициент ($\beta_k < 1$) и перемножается с коэффициентом качества поверхности.

$$\beta = \frac{\sigma_{-1r}}{\sigma_{-1}}$$