

## 18. ПРОЧНОСТЬ ПРИ НАПРЯЖЕНИЯХ, ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ

Сопротивление материалов действию нагрузок, меняющих свою величину или величину и знак во времени, существенно отличается от сопротивления тех же материалов статическому и ударному действию нагрузок.

В условиях действия повторно-переменных нагрузок (и, соответствующих им напряжений) работают различные элементы конструкций и даже целые конструкции.

**Разрушение материалов под действием переменных во времени нагрузок наблюдается при рабочих нагрузках (напряжениях), величина которых намного меньше в сравнении с их допускаемыми значениями.**  
**Разрушение конструкции чаще всего происходит внезапно, что очень опасно!**

Проблема разрушения материалов под действием переменных во времени нагрузок возникла перед инженерами и учеными очень давно, интерес к ней не ослабевает уже второе столетие.

К таким конструкциям и их элементам можно отнести:

- мостовые сооружения, например, элементы фермы моста при движении транспортных средств;
- несущие конструкции транспортных средств;
- сварные конструкции и соединения;
- валы (в том числе и коленчатые валы) и оси (например, вагонных колес);
- штоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, паровых машин и т.п.;
- болты, шпильки в разъемных соединениях;
- подшипниковые узлы;
- шестерни и т.п.

Поэтому явление разрушения под действием переменных во времени нагрузок изучают специалисты различных отраслей.

### 18.1 Характеристики циклов

#### Цикл, период цикла.

Рассмотрим механизм появления переменных нагрузок (напряжений) на примере оси вагона (рис. 18.1 а). При движении ось вагона вращается и нагружена собственным весом вагона и весом перевозимого груза.

При статическом действии нагрузок  $P$  на ось она нагружена изгибающими моментами, имеет круглое поперечное сечение (рис. 18.1 б).

Из эпюры  $M_X$  видим (рис. 18.1 в), что в данный момент времени сжаты нижние волокна. Средняя часть бруса испытывает прямой чистый изгиб. Опасными в данном случае, являются сечения на опорах.

Согласно теории изгиба в сечении бруса возникают нормальные напряжения, которые определяются по формуле Навье. Для точки  $B$  сечения вала (рис. 18.1.г):

$$\sigma_B = \frac{M_X \cdot y}{I_X}. \quad (18.1)$$

Величина нормального напряжения прямо пропорциональна действующему в сечении изгибающему моменту (по величине не меняется) и положению точки (координате  $y$ ).

При движении колеса жестко соединенная с ним ось вращается с частотой  $\omega$ . Следовательно, через каждые  $180^\circ$  знак  $M_X$  будет меняться на противоположный.

Закон изменения координаты  $y$  можно записать в виде (рис. 18.1.з):

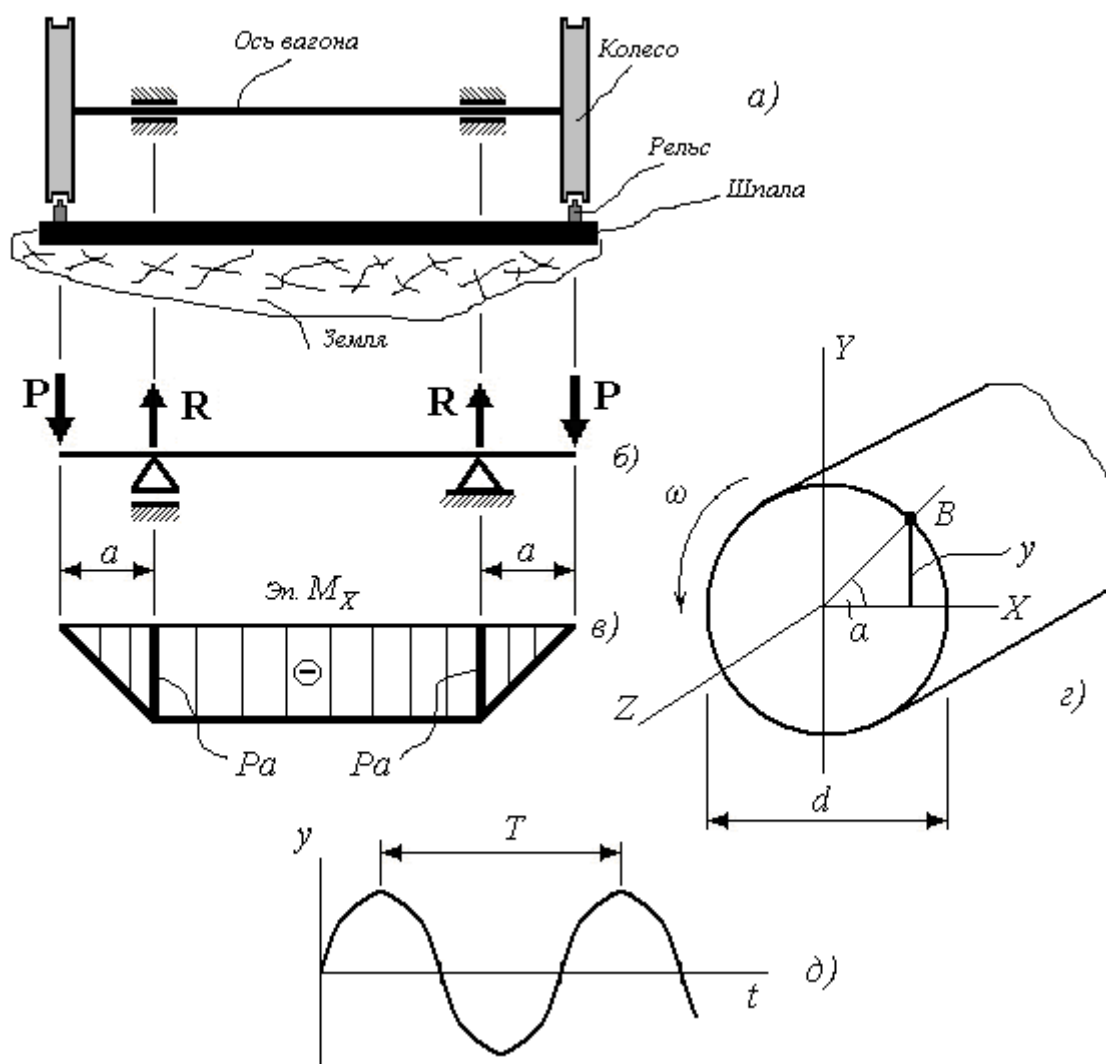


Рис. 18.1. К выявлению механизма появления переменных во времени нагрузок (напряжений)

$$y = \frac{d}{2} \sin \alpha = \frac{d}{2} \sin \omega t. \quad (18.2)$$

Таким образом, график изменения  $y$  во времени  $t$  изображается синусоидой (рис.18.1 д).

Следовательно, и нормальные напряжения (см. формулу 18.1) будут изменяться во времени по знаку и величине по такому же – синусоидальному закону.

**ПЕРИОД ЦИКЛА  $T$**  – есть промежуток времени между двумя последующими максимальными (или минимальными) значениями нагрузок (напряжений).

**ЦИКЛ НАГРУЗОК (НАПРЯЖЕНИЙ)** – есть совокупность всех последовательных значений переменных нагрузок (напряжений) за один период процесса их изменения.

Многочисленные эксперименты показали, что **вид кривой** не имеет определяющего влияния на прочность. Иначе говоря, при обработке результатов измерений нагрузок (напряжений), полученные **кривые аппроксимируют синусоидой** (рис.18.2).

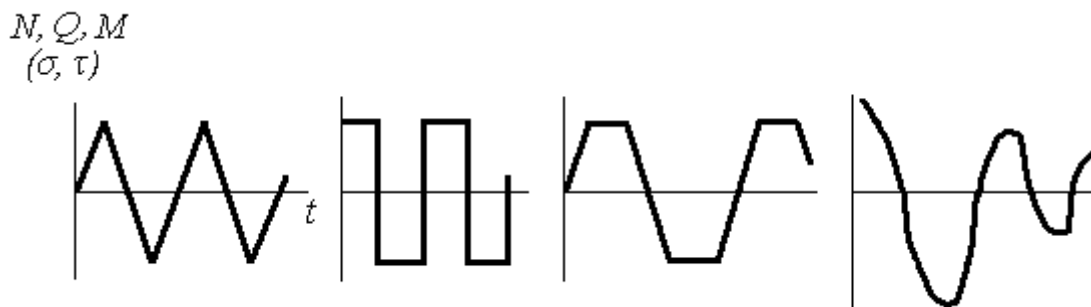


Рис. 18.2. Примеры некоторых периодических кривых, описывающих изменение нагрузки во времени

**Максимальное и минимальное напряжение в цикле, средние и амплитудные значения напряжений.**

Упомянутые выше эксперименты показывают, что **прочность материала конструкций** при их повторно-переменном нагружении зависит в первую очередь от значений **максимального и минимального напряжений в цикле**.

В зависимости от вида нагружения в статике (действующих силовых факторов), в поперечных сечениях возникают или нормальные  $\sigma$  или касательные  $\tau$  напряжения. Поэтому при расчетах на повторно-переменное нагружение проводят расчеты и по  $\sigma$  и по  $\tau$ . Все рассуждения при изложении данной темы будем проводить для нормальных напряжений. В случае действия касательных напряжений рассуждения и выводы аналогичны.

Введем обозначения и дадим определения.

**Максимальное** (наибольшее по величине) напряжение в цикле  $\sigma_{\max}$  ;

**минимальное** (наименьшее по величине) напряжение в цикле  $\sigma_{\min}$  ;

**среднее напряжение** в цикле (алгебраическая полусумма максимального и минимального напряжений)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (18.3)$$

**амплитудное напряжение** в цикле (алгебраическая полуразность максимального и минимального напряжений)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (18.4)$$

Знак среднего напряжения может быть, как (+), так и (-), знак амплитудного напряжения всегда (+).

**Коэффициент асимметрии цикла.**

Еще одна характеристика цикла – коэффициент асимметрии цикла. Его величина определяется отношением

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (18.5)$$

**Циклы, для которых значения  $r$  равны, называются подобными.**

Коэффициент асимметрии может иметь любые значения, знак зависит от знаков напряжений.

С учетом зависимостей (18.3 – 18.5):

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a; \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a; \quad (18.6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}(1+r); \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}(1-r). \quad (18.7)$$

## 18.2 Виды циклов

Рассмотрим некоторые виды циклов, которые часто встречаются в расчетной практике.

Циклы изменения напряжений в первую очередь могут быть **знакопостоянными** и **знакопеременными**.

**Знакопостоянные циклы** (рис. 18.3). Это многократное нагружение, когда во времени меняется только величина напряжения.

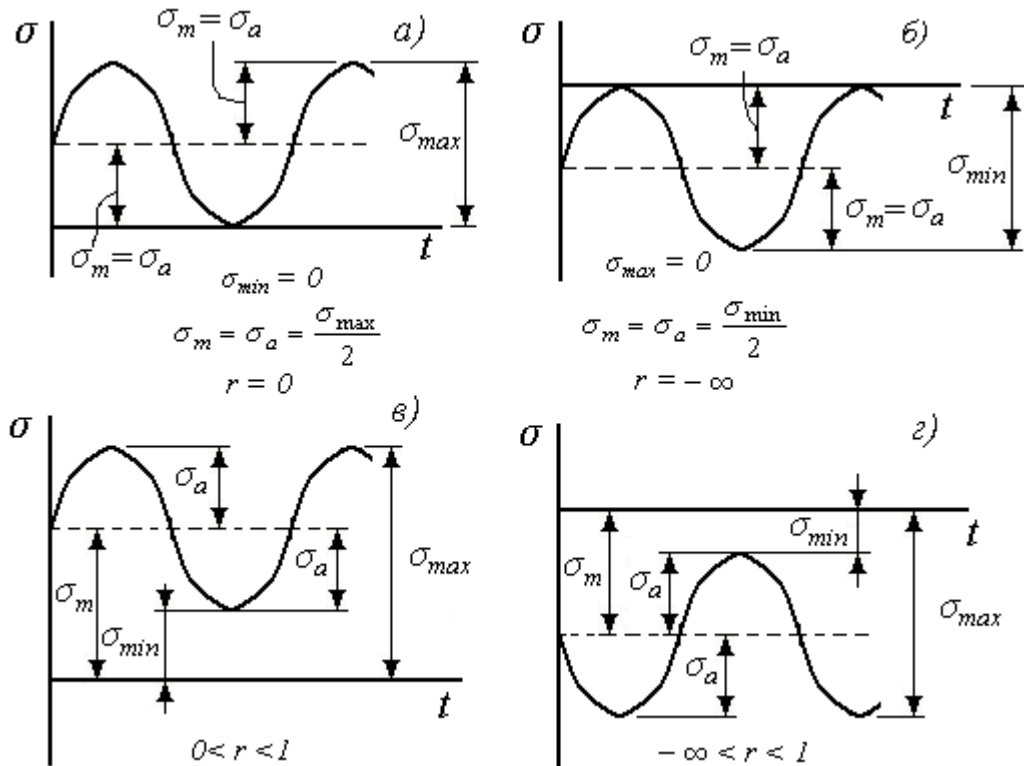


Рис. 18.3. Знакопостоянные циклы и их характеристики

На рис. 18.3 изображены знакопостоянные циклы:

– **положительный отнулевой** (пульсационный) **цикл** (рис. 18.3 а). Для этого цикла

$$\sigma_{\max} > 0; \quad \sigma_{\min} = 0; \quad \sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}; \quad r = 0. \quad (18.8)$$

– **отрицательный отнулевой цикл** (рис. 18.3 б). Для этого цикла

$$\sigma_{\max} = 0; \quad \sigma_{\min} < 0; \quad \sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\min}}{2}; \quad r = -\infty. \quad (18.9)$$

– **положительный цикл** (рис. 18.3 в). Для этого цикла

$$\sigma_{max} > 0; \quad \sigma_{min} > 0; \quad 0 < r < 1. \quad (18.10)$$

– **отрицательный цикл** (рис. 18.3 г). Для этого цикла

$$\sigma_{max} < 0; \quad \sigma_{min} < 0; \quad -\infty < r < 1. \quad (18.11)$$

Среднее и амплитудное значения напряжений определяются по формулам (18.3 и 18.4)

Отметим, что при **статическом действии нагрузки**,  $\sigma$  не изменяется во времени ( $const, > 0$  или  $< 0$ ), тогда  $\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_m$ ;  $\sigma_a = 0$ ;  $r = 1$ .

**Знакопеременные циклы** (рис.18.4). Это многократное нагружение, когда напряжение **меняет** во времени как **величину**, так и **знак**.

В частности – это так называемые **симметричные и несимметричные** (асимметричные) **циклы**.

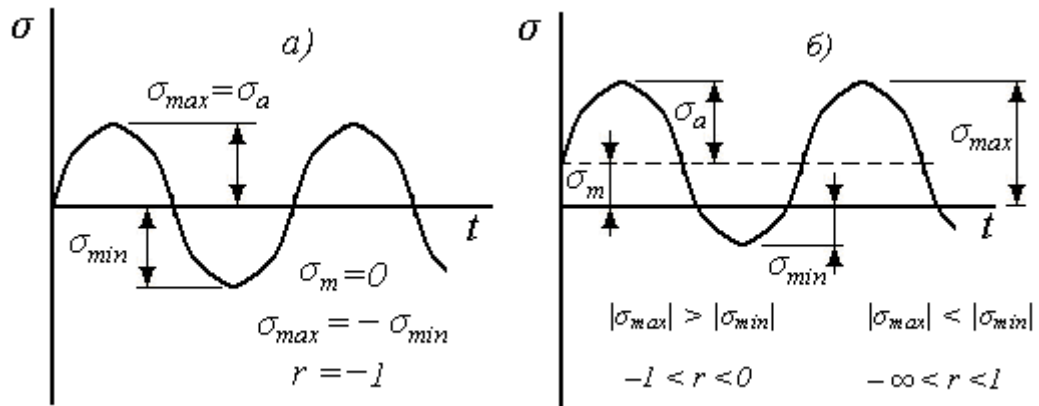


Рис. 18.4. Знакопеременные циклы и их характеристики

На рис. 18.4 изображены знакопеременные циклы:

– **симметричный цикл** (рис. 18.4 а). Для этого цикла

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min}; \quad \sigma_a = \sigma_{max}; \quad \sigma_m = 0; \quad r = -1 \quad (18.12)$$

– **несимметричный цикл** (рис. 18.4 б). Для этого цикла возможно два варианта:

$$1) |\sigma_{max}| > |\sigma_{min}|, \text{ тогда } -1 < r < 0.$$

$$2) |\sigma_{max}| < |\sigma_{min}|, \text{ тогда } -\infty < r < 1.$$

Наиболее опасным является **симметричный знакопеременный цикл** с  $r = -1$ .

### 18.3 Понятия об усталостном разрушении и выносливости материала

#### Понятие об усталости.

Как было указано выше, огромный и многолетний опыт эксплуатации конструкций указывает на то, что **под действием повторно-переменных напряжений**, разрушение наступает намного раньше и при значительно меньших нагрузках, чем, при статическом нагружении. Причем **разрушение происходит ВНЕЗАПНО**.

Разрушение конструкций происходило через некоторое время их эксплуатации, поэтому предположили, что **материал из пластичного превращается в хрупкий**, иначе говоря **«материал устает»**. На изломах, наблюдавшихся при разрушении эле-

ментов конструкций, наблюдалась картина, характерная для хрупкого разрушения. Так считали в начале XIX века. Этот термин **«усталость материала или конструкции; усталостное разрушение; расчеты на усталость; усталостная прочность»** сохраняется по сей день.

Систематические исследования усталости начал немецкий ученый Велер. Длительное время под усталостью ученые и инженеры понимали **явление разрушения материала или конструкции при многократном повторении нагружений**.

**Выносливость, предел выносливости, долговечность.** При расчетах на усталость, при анализе результатов экспериментов определяются некоторые характеристики. Опыты показывают, что для разрушения от усталости **недостаточно переменной напряжений**. Необходимо также, чтобы **рабочие (номинальные) напряжения** имели определенную величину.

**ВЫНОСЛИВОСТЬ – способность материалов и конструкций сопротивляться разрушению при их повторно-переменных нагружениях.**

**ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ (предел усталости) – максимальное напряжение, при котором материал способен сопротивляться нагружению не разрушаясь, при любом произвольно большом числе циклов нагружений.**

Обычно при расчетах и испытаниях определяется **не произвольно большое число циклов**, а так называемое **базовое число циклов  $N_0$** .

Различают **малоцикловую усталость** (разрушение наступает при малом числе циклов нагружения) и **многоцикловую усталость** (разрушение наступает при большом числе циклов нагружения).

**Предел выносливости** материала обозначают **символом напряжений с индексом, указывающим на величину коэффициента асимметрии  $r$** : при изгибе, растяжении-сжатии –  $\sigma_r$ ; при кручении, сдвиге –  $\tau_r$ :

$\sigma_{-1}$  – симметричный цикл,  $\sigma_0$  – отнулевой (пульсационный) цикл,  $\sigma_{0,2}$  – асимметричный цикл при  $r = 0,2$ ).

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ – число циклов, которое выдерживает до разрушения материал или конструкция.**

## 18.4 Механизм усталостного разрушения

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал, проанализированы причины разрушений различных конструкций. Выводы следующие.

**1.** Разрушение происходит чаще всего при рабочих напряжениях  $\sigma \ll \sigma_B$  и  $\sigma_T$  (пределов прочности и текучести) материала, из которого изготовлена конструкция или деталь – это характерно для **многоцикловой усталости**. Объясняется это обстоятельство значительной неоднородностью структуры, анизотропией механических свойств, наличием дефектов, историей и условиями нагружения и эксплуатации, конструктивными особенностями и технологией изготовления и т.п. **Малоцикловая усталость** чаще всего наблюдается при рабочих напряжениях, близких по величине пределу текучести материала.

**2.** **Усталостное разрушение является хрупким**, т.е. происходит без видимых пластических деформаций. На то, что разрушение хрупкое, указывает и вид усталостного излома. Он имеет **две зоны**: одна **гладкая** (притертая), **образовавшаяся** в следст-

вие развития трещины, другая – крупнозернистая, образовавшаяся при окончательном долоте ослабленного развившейся усталостной трещиной сечения детали.

Например, при вращении изгибаемой оси (рис. 18.1 б) нормальные напряжения в сечении, как известно, распределяются по линейному закону и имеют экстремальные значения на поверхности. Знак напряжений через каждые  $180^\circ$  меняется (рис. 18.5 а).

Трещина при нагружении периодически раскрывается и закрывается, края ее трутся друг о друга (рис. 18.5 б). Логично предположить, что и разрушение начнется с поверхности (особенно, если на поверхности имеется дефект) и будет развиваться вглубь сечения.

Эти наблюдения и привели исследователей к выводу, что под действием переменных напряжений изменяется структура материала. Считали, что материал имеет волокнистую структуру и часть его при усталостном нагружении к моменту разрушения приобретает кристаллическую структуру.

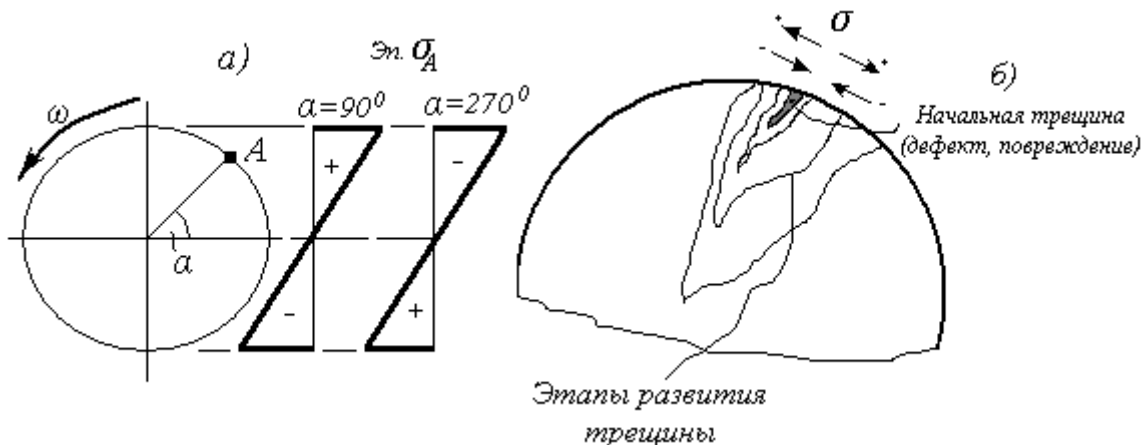


Рис. 18.5 Изменение знака нормальных напряжений в точке  $A$  при чистом изгибе (а) и картина развития трещины (б)

**3. Только в начале XX столетия**, после исследований структуры было показано, что **никакой перекристаллизации не происходит**. Конструкционные материалы в основном являются кристаллическими веществами, они состоят из зерен. Они (зерна) обладают различными механическими свойствами и поэтому нагружаются по-разному. При статическом нагружении деформация охватывает весь объем образца. При переменных нагрузках деформация сосредотачивается в ограниченном объеме (несколько зерен). В таких перенапряженных зернах возможно наиболее раннее образование трещин. То же самое происходит с практически всегда имеющимися в материале дефектами. Трещина постепенно развивается, что в конечном итоге приводит к усталостному излому. **В вершине трещины реализуется объемное напряжение состояние.**

В современной трактовке

**УСТАЛОСТЬ – процесс накопления повреждений, приводящий к образованию и развитию трещин и последующему разрушению.**

**4. Механизм образования трещин при повторно-переменном напряжении** весьма сложен и не может считаться полностью изученным. Несомненно, что:

– процессы, происходящие в материале при повторно-переменном нагружении, носят **резко выраженный местный характер**;

– **решающее влияние** на явление усталости **оказывают касательные напряжения**, вызывающие пластические сдвиги и разрушение путем среза.

**Образование первоначальной трещины связано с действием касательных напряжений (сдвиг), а ее развитие – с действием нормальных напряжений (отрыв).**

**Природа возникновения переменных во времени напряжений различна.** Чаще всего это механические напряжения, возникающие от действия внешних изменяющихся нагрузок.

Ряд деталей и конструкций при эксплуатации воспринимают действие высоких и низких температур, которые могут также изменять свою величину во времени. Это еще один самостоятельный раздел наук о прочности – **термическая усталость** и связанные с ней сопутствующие процессы (например, **разгар поверхности**, соприкасающейся с жидким металлом).

Примечание. **Механизм развития повреждений в различных условиях силового, теплового, коррозионного воздействия на материал конструкций, в том числе с воздействием циклических напряжений**, подробно изучается в учебных дисциплинах: «**Механика разрушения**» (см., например, учебное пособие И.М. Кузменко, Могилев, МГТУ, 2001); «**Основы трибофатики**» (Л.А. Сосновский – г. Гомель).

Серьезное внимание **обеспечению усталостной прочности сварных соединений и конструкций** уделяют специалисты сварочного производства – при проектировании, изготовлении и эксплуатации таких конструкций.

Строгого теоретического решения задачи по расчету конструкций на усталостную прочность (расчету на выносливость) до настоящего времени не предложено. В основном используются экспериментально-теоретические методы.

### 18.5 Кривые усталости, определение предела выносливости материала

Как будет показано ниже, при исследованиях, при проведении расчетов и проектировании используется соответствующая характеристика – **предел выносливости** материала (образца, конструкции) в заданных условиях нагружения.

Возможность разрушения путем постепенного развития трещины обуславливается двумя обстоятельствами:

- **периодическим колебанием напряжений** между определенными крайними пределами;
- **превышением** наибольшими действительными (рабочими, номинальными) напряжениями в элементе конструкции **предела выносливости материала**.

Предел выносливости **определяется экспериментально**, по соответствующим методикам на специализированном оборудовании. **Методика испытаний регламентируется соответствующими стандартами**. Для определения предела выносливости изготавливают соответствующие партии образцов. По результатам испытаний строятся графики – **кривые усталости**. Эти кривые строят для «идеальных» образцов или для образцов с исследуемым поверхностным фактором.

#### **Кривая усталости для симметричного цикла (ДИАГРАММА ВЕЛЛЕРА).**

Предел выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1}$  – наиболее часто используемая в расчетах характеристика.

Испытания проводят на специальных машинах. Это зависит от того, воздействие какой нагрузки исследуется: изгиб, растяжение, кручение и т.п. Например, может быть использована схема нагружения (рис. 18.6 а).

Для получения кривой и определения значения  $\sigma_{-1}$  изготавливают партию образцов в количестве **6-10 штук**, **диаметр рабочей части 7-10 мм**. Для испытаний применяют гладкие цилиндрические образцы с хорошо обработанной поверхностью (полированной), или образцы с исследуемым фактором. Рабочая часть в первом случае обычно имеет специфическую форму боковой поверхности – **эвольвенту** (рис. 18.6 б).

Образец нагружают через подшипники так, чтобы средняя (рабочая) часть образца подвергалась чистому изгибу. При этом, по аналогии с рис. 18.1, при вращении



образца получаем симметричный цикл изменения нормальных напряжений – синусоиду.

Максимальная величина нормального напряжения, в соответствии с формулой Навье (18.1), изменяется в процессе испытаний изменением грузов  $P$  на подшипниках.

**Первый образец** нагружают до напряжения  $\sigma_{(1)}$ , величина которого близка к пределу прочности материала образца  $\sigma_B$ . При этом напряжении он разрушится при сравнительно небольшом числе циклов  $N_1$ .

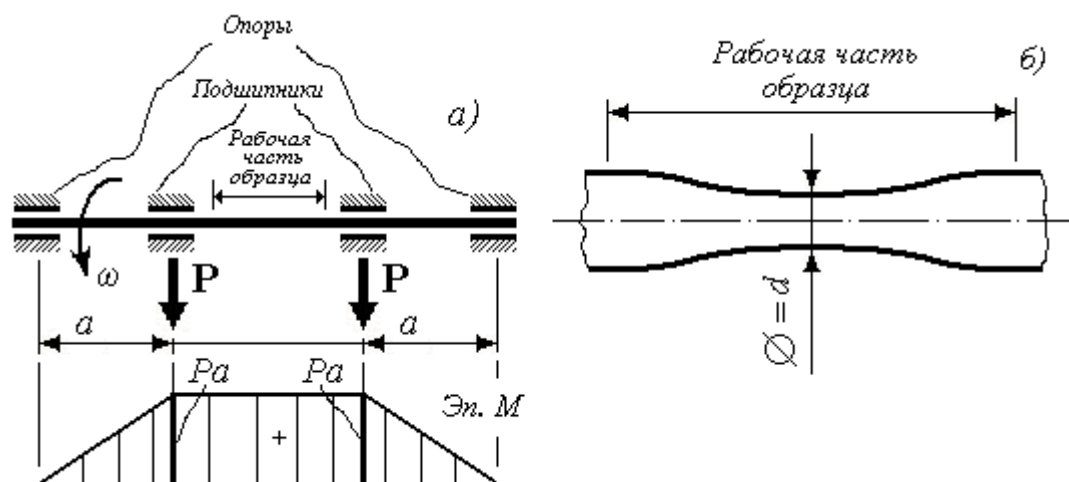


Рис. 18.6. Схема испытаний лабораторного образца на чистый изгиб (а) и форма боковой поверхности образца (б)

**Второй образец** нагружают напряжениями  $\sigma_{(2)} < \sigma_{(1)}$ . Он разрушится при несколько большем числе циклов  $N_2$ . Последующие образцы испытывают, снижая величину напряжений, при этом число циклов до разрушения увеличивается.

Испытания заканчивают, когда при некотором значении нормальных напряжений образец не разрушается, достигнув базового числа циклов  $N_0$ , или базы испытаний (см. формулировку определения «предел выносливости»).

Соединив полученные точки плавной линией, получаем, кривую усталости (кривую Велера) – график  $\sigma - N$  (рис. 14.6 а).

Впервые такие исследования провел Велер в 1852 – 1862 гг. Часто кривую Велера строят в полулогарифмических координатах  $\sigma - \lg N$  (рис.18.7 б).

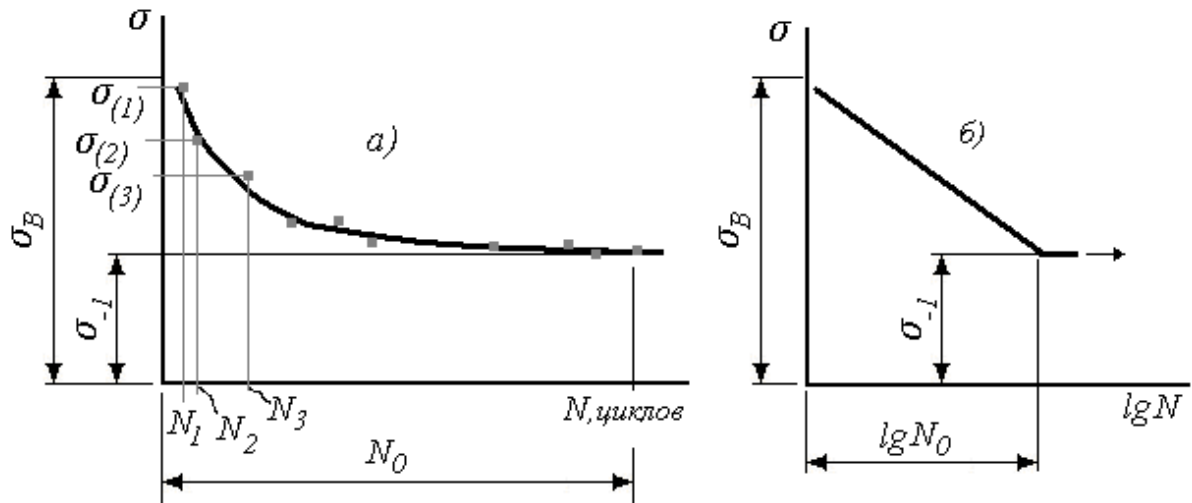


Рис. 18.7. Кривая усталости при симметричном цикле (Велера)

Кривая Велера характерна тем, что по мере снижения напряжений крутизна ее уменьшается, и она **асимптотически приближается к некоторой горизонтальной прямой**, которая отсекает отрезок на оси напряжений. Это напряжение и есть **предел выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1}$** .

Для полированных лабораторных образцов из малоуглеродистой стали, **базовое число циклов  $N_0 = 10^7$** , цветные металлы и сплавы имеют значение  $N_0$  в 5-10 раз большее, чем для стали.

Кривые усталости для цветных металлов не имеют асимптот, поэтому в качестве  $\sigma_{-1}$  для таких материалов берут наибольшее напряжение, при котором образец выдержал не менее  $10^8$  циклов, т.е. для таких материалов определяется **предел ограниченной выносливости**.

Анализ результатов многих исследований показал, что предел выносливости связан определенной зависимостью с пределом прочности. Например:

– для углеродистых сталей  $\sigma_{-1} = (0,4...0,5) \sigma_B$ ;

– для легированных сталей  $\sigma_{-1} = 400 + \frac{1}{6} \sigma_B$ , МПа;

– для цветных металлов и сплавов  $\sigma_{-1} = (0,25...0,5) \sigma_B$ .

Если для исследуемого материала не выявляется базовое число циклов, то определяется так называемое условное базовое число циклов.

#### **Кривые усталости для асимметричного цикла.**

В реальных условиях эксплуатации детали машин и механизмов нагружены нагрузками, цикл изменения которых отличается от симметричного. Коэффициенты асимметрии таких циклов могут иметь любые другие значения, чем  $r = -1$ . Для выполнения расчетов нужно знать значение предела выносливости  $\sigma_r$  или  $\tau_r$ . Испытания более сложны по методике их проведения, испытательные установки также усложняются. Для получения **одной экспериментальной точки на диаграмме необходимо испытать не менее 10 образцов**.

Как видим (рис. 18.3 и 18.4), испытываемый образец необходимо нагружать определенными, неодинаковыми по величине и знаку, напряжениями.

В качестве одного из вариантов схемы нагружения образца, может быть предложена, например, схема (рис. 18.8 а). На образце установлена пружина, создающая

постоянное по величине **нормальное напряжение растяжения**, которое будет накладываться на **напряжения изгиба** (рис.18.8 б).

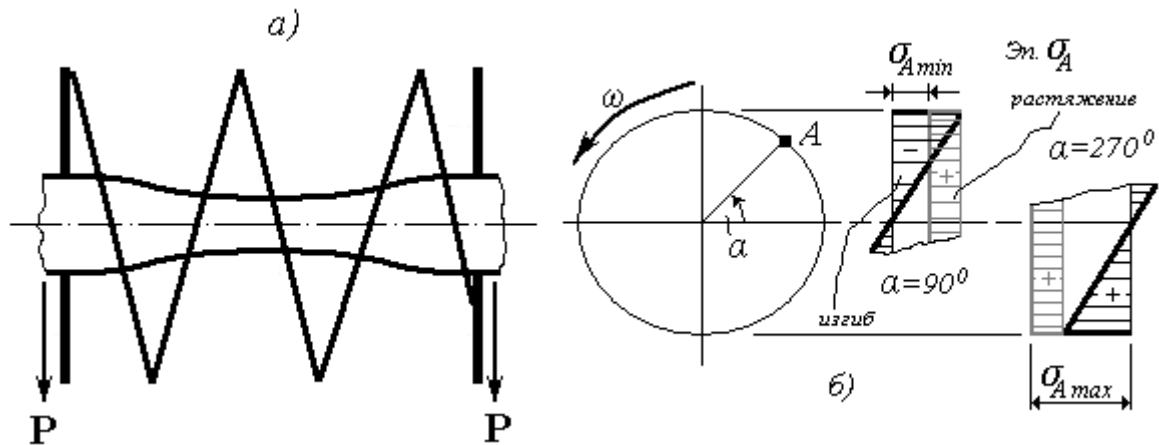


Рис. 18.8. Схема установки, реализующей асимметричный цикл (а) и эпюра распределения напряжений (б)

При вращении образца напряжения  $\sigma_{раст.}$  и  $\sigma_{изгиба}$  суммируются и получаем разные по величине и знаку максимальные и минимальные напряжения в цикле.

Результаты испытаний обычно представляют в виде одной из двух диаграмм:

- в виде зависимости между  $\sigma_m$  и  $\sigma_a$  (диаграмма предельных амплитуд);
- в виде зависимости между  $\sigma_m$  и  $\sigma_{max}$  (диаграмма предельных напряжений).

ний).

**Диаграмма предельных амплитуд.** Ее иногда называют диаграммой Хэйга. Диаграмму строят в координатах  $\sigma_m$  и  $\sigma_a$ . В каждой серии из 10 образцов задаются значением  $r$ , варьируют значениями  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  так, чтобы значение  $\sigma_m$  оставалось постоянным (рис. 18.9).

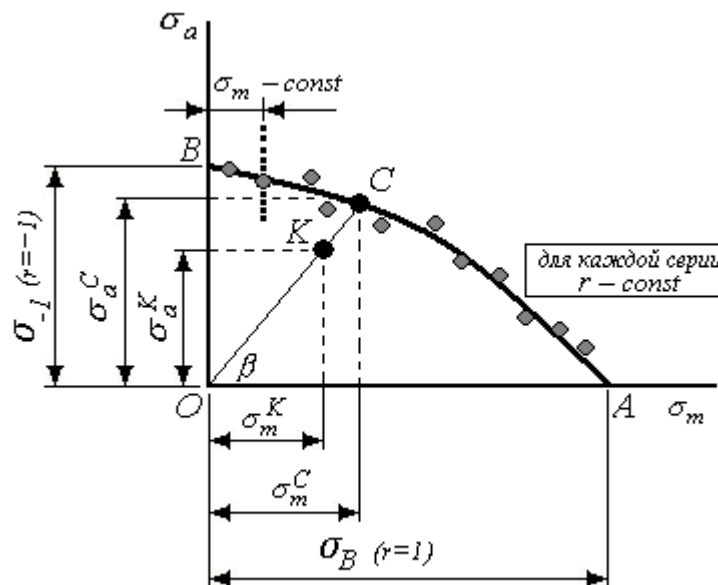


Рис. 18.9. Диаграмма предельных амплитуд

Путем последовательных испытаний образцов (построения диаграмм Велера) находят такое наибольшее значение амплитуды цикла  $\sigma_a$ , при котором материал спо-

собен еще выдерживать неограниченное число циклов или базовое число циклов  $N_0$  (на диаграмме эта точка обозначена  $\blacklozenge$ ). Таким образом, для каждой серии (при  $r = const$  и  $\sigma_m = const$ ) получаем соответствующие значения  $\sigma_a$  и пределы выносливости исследуемых циклов.

**Предел выносливости**, в соответствии с его определением (*наибольшее напряжение, при котором образец выдерживает базовое число циклов нагружения*) и формулой (18.6) есть сумма:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a. \quad (18.13)$$

На диаграмме (рис. 18.9) точке  $A$  соответствует предел прочности материала образца при простом растяжении, а точке  $B$  – предел выносливости этого материала при симметричном цикле.

**Предел выносливости определяют** следующим образом.

- 1) расчетом по формулам сопротивления материалов или экспериментально определяются значения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ ;
- 2) определяются значения  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$ ;
- 3) находят точку с соответствующими координатами (на рис. 18.9 – точка  $K$  с координатами  $\sigma_a^K$  и  $\sigma_m^K$ );
- 4) через точки  $K$  и  $O$  проводят луч до пересечения с предельной кривой (точка  $C$ ).

$$\text{С учетом зависимостей (18.8)} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a^K}{\sigma_m^K} = \frac{1 - r_K}{1 + r_K};$$

- 5) точка  $C$  будет соответствовать предельному нагружению материала детали

$$\sigma_{\max}^c = \sigma_a^c + \sigma_m^c = \sigma_r^c. \quad (18.14)$$

Если точка  $K$  будет располагаться ниже предельной кривой, то деталь может работать в данном режиме неограниченно долго. Если эта точка будет располагаться выше кривой – то деталь разрушится после некоторого числа циклов.

Коэффициенты асимметрии рабочего и предельного циклов напряжений одинаковы ( $r = const$ ), следовательно, эти **циклы подобны**; по диаграмме можно определить **коэффициент запаса усталостной прочности** (как отношение предела выносливости к максимальному напряжению заданного цикла):

$$n_r = \frac{\sigma_{\max}^c}{\sigma_{\max}^k} = \frac{\sigma_r^c}{\sigma_m^k + \sigma_a^k}. \quad (18.15)$$

**Кривая  $AB$  может быть заменена прямой  $AB$  (в запас прочности)**. Получаем диаграмму (рис. 18.10). Для ее построения достаточно знать  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_B$ .

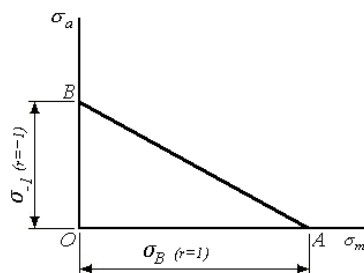


Рис. 18.10. Схематизированная диаграмма предельных амплитуд

Если материал пластичен, то, как известно, он имеет площадку текучести и опасным напряжением будет предел текучести материала (точки  $M$  и  $L$  на этой диаграмме, рис. 18.11). Выделим зону, соответствующую циклам с максимальным напряжением, **меньшим предела текучести** и пределу выносливости при симметричном цикле – см. серую линию на диаграмме (см. рис. 18.11). Таким образом, из всей области рабочих напряжений исключают ту область, где напряжения превосходят указанные выше значения напряжений.

Уравнение прямой  $LM$  в отрезках в этом случае имеет вид:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_T} + \frac{\sigma_a}{\sigma_T} = 1, \text{ откуда } \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a = \sigma_T.$$

Примечание: уравнение прямой  $\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$ ,  $a = b = \sigma_T$ .

Таким образом, безопасными будут циклы, лежащие **ниже линии  $BDL$** .

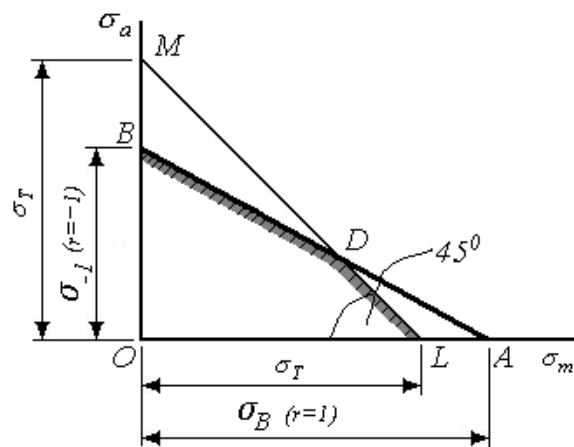


Рис. 18.11. Область безопасных циклов напряжений для пластичного материала

Кроме того, возможно еще одно упрощение при построении диаграммы:

точку  $D$  диаграммы (рис. 18.11) определяют координатами, равными половине

предела выносливости при отнулевом цикле:  $\frac{\sigma_0}{2} = \frac{\sigma_T}{2}$  (рис. 18.12). В этом случае

$$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m = \sigma_T = \sigma_0.$$

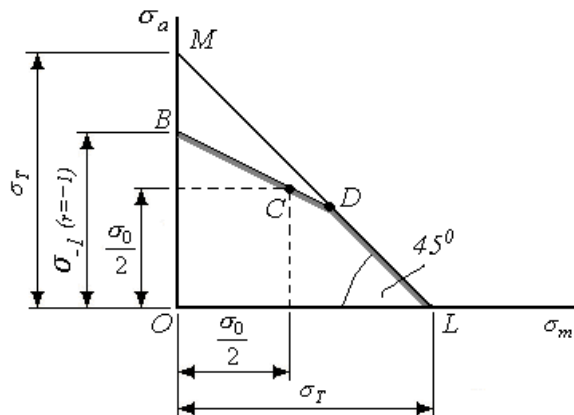


Рис. 18.12. Схематизированная диаграмма Хэйга с учетом пластической деформации материала образца

Область безопасной работы образца или конструкции лежит ниже линии  $B - C - D - L$ .

**Диаграмма предельных напряжений.** Другое название – диаграмма Смита. Диаграмма строится в координатах  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ .

Приведем **примерный вид диаграммы** для среднеуглеродистой стали (для циклов с положительным средним напряжением  $\sigma_m$ ). Каждый цикл на диаграмме изображается двумя точками:  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  (рис. 18.13):

– **симметричный цикл** характеризуется точками  $A$  и  $A_1$  на диаграмме. Точка  $B$  соответствует предельным постоянным напряжениям  $\sigma_{\max} = \sigma_m = \sigma_B$ ;

– **отнулевой цикл** характеризуется точками  $C$  и  $F$  на диаграмме, для которых значения напряжений:  $\sigma_{\max} = \sigma_0$ ;  $\sigma_{\min} = 0$ ;  $\sigma_m = \frac{\sigma_0}{2}$ .

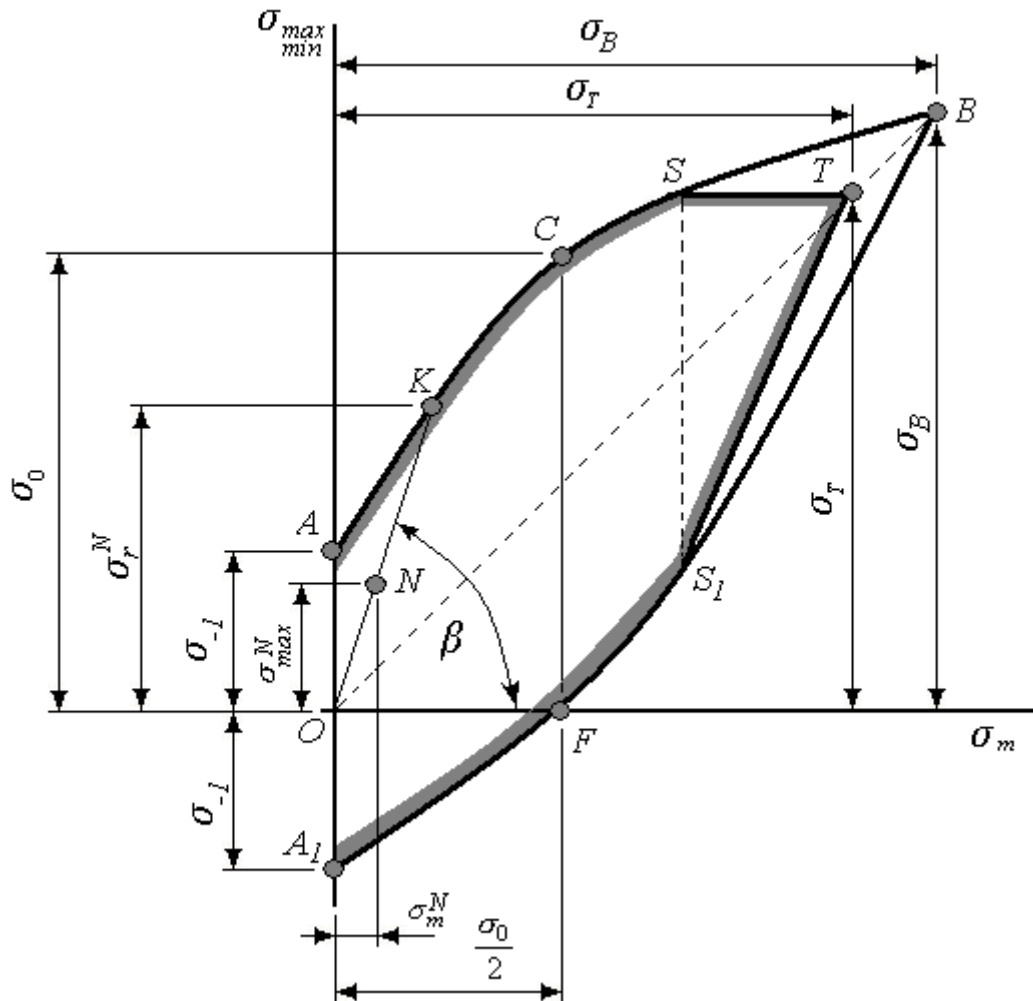


Рис. 18.13. Диаграмма предельных напряжений

Для любого цикла с заданным коэффициентом асимметрии  $r$  предел выносливости на диаграмме предельных напряжений определяют следующим образом:

- по значениям  $\sigma_m^N$  и  $\sigma_{\max}^N$  находят точку  $N$ ;
- из начала координат (т.  $O$ ) проводят прямую до пересечения с линией диаграммы. Тангенс угла  $\beta$  равен:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{\max}^N}{\sigma_m^N} = \frac{\sigma_{\max}}{\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}} = \frac{2}{1+r}.$$

– по ординате точки  $K$  определяется значение предела выносливости  $\sigma_r^N$  для цикла с значениями в точке  $N$ .

Луч  $OB$  характеризуется напряжениями, постоянными по времени:

$$\sigma_{\max} = \sigma_B = \sigma_m; \quad \sigma_a = 0.$$

Получим **область безопасных циклов** для пластичных материалов. Определим положение точки  $T$  на линии  $OB$ , которая будет иметь координаты:  $\sigma_{\max} = \sigma_m = \sigma_T$ .

Через точку  $T$  проведем две прямые:  $ST$  и  $S_1T$ . Искомая область будет ограничена линией  $ASTS_1A_1$  (на рис. 18.13 – область, ограниченная серой линией).

## 18.6 Влияние различных факторов на предел выносливости.

Усталостная прочность материалов и конструкций (предел выносливости) в **значительной степени и существенно** зависит от целого ряда факторов:

– конструктивных особенностей и технологии изготовления деталей и конструкций, например, отверстия, сварные швы, дефекты и т.п. Они объединяются термином – **концентрация напряжений**;

- абсолютных размеров деталей;
- состояния и качества обработки поверхности деталей;
- особенностей окружающей среды;
- особенностей нагружения, в частности паузы (перерывы в нагружении);
- температуры эксплуатации и ряда других факторов.

Рассмотрим наиболее важные факторы более подробно.

### 1. Концентрация напряжений.

Расчеты конструкций при различных видах нагружения проводятся в предположении, что напряжения распределяются по сечению по соответствующим этим видам нагружения законам и не зависят от особенностей приложения нагрузки, наличия дефектов и т.п. (известный нам **принцип Сен-Венана**). При этом расчеты при статическом нагружении дают незначительную ошибку.

Однако, если в поперечном сечении имеются дефекты (отверстия, выточки, резкое изменение размеров и т.д.), то равномерность распределения напряжений нарушается. На это обстоятельство впервые указал немецкий механик **Кирш в 1898 г.** Он, используя методы теории упругости, проанализировал распределение нормальных напряжений **в тонкой пластине с малым отверстием** (рис. 18.14).

Пластина **равномерно по сечению** нагружена **статически** растягивающей силой  $P$ .

Диаметр отверстия  $d$  мал по сравнению с шириной пластины  $b$  и не должен превышать значения  $d = 0,1 b$ .

Вдали от отверстия, в соответствии с принципом Сен-Венана, нормальные напряжения определяются по известной нам формуле. Обозначим их  $\sigma_{ном}$  – **номинальные напряжения**.

Расчеты Кирша показали, что в непосредственной близости от дефекта напряжения резко возрастают – это **местные напряжения**  $\sigma_M$  (вблизи отверстия):

$$\sigma_M = 3 \sigma_{ном}. \quad (18.16)$$

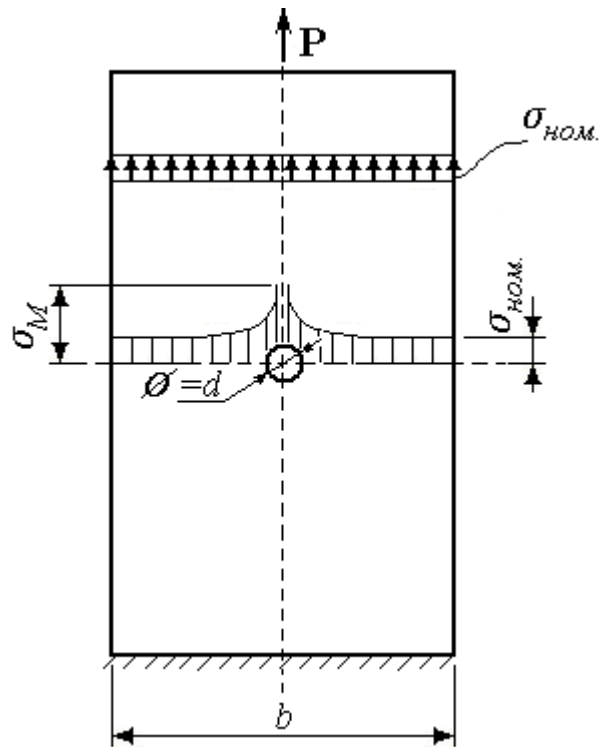


Рис.18.14 Распределение напряжений в растянутой пластине вблизи отверстия

Впоследствии Колосов (1909 г.) и Инглис (1913 г.) рассмотрели распределение напряжений в пластине с отверстием в виде эллипса с полуосями  $a$  и  $d$ , причем большая полуось –  $a$ , располагалась перпендикулярно нагрузке. Расчетная формула имеет вид:

$$\sigma_M = \left(1 + 2\frac{a}{d}\right)\sigma_{\text{НОМ.}} \quad (18.17)$$

Видим, что  $\sigma_M$  значительно превышают  $\sigma_{\text{НОМ.}}$ .

**Резкое увеличение напряжений вблизи дефектов получило название КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ.  
Разного рода дефекты объединяются термином КОНЦЕНТРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ.**

Этот эффект можно проиллюстрировать на примере растяжения пластины с острым дефектом (рис. 18.15).

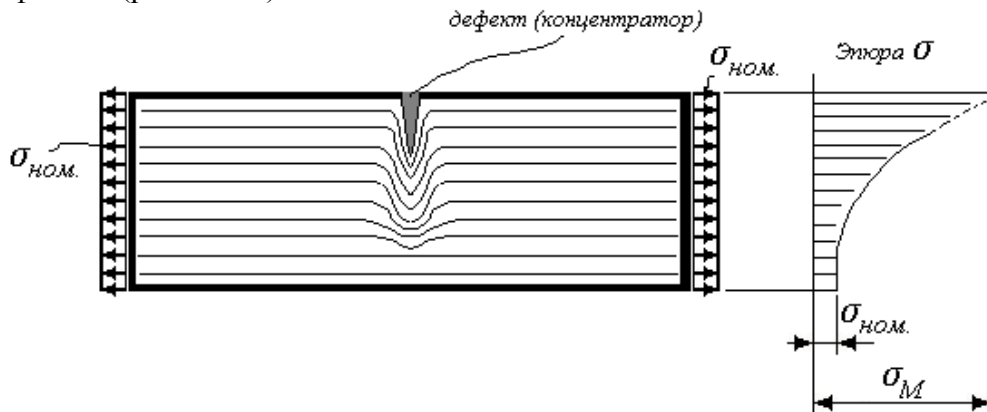


Рис. 18.15. Концентрация напряжений при вершине дефекта



«Силовые» линии растягивающих напряжений вблизи дефекта искривляются, огибая его. **Чем ближе к вершине – тем сильнее эти линии искривляются.** Иначе говоря, напряжения вблизи дефекта резко возрастают.

*Как показывает опыт эксплуатации конструкций и эксперименты в лабораторных условиях, при действии переменных напряжений положение усугубляется. Разрушение конструкций и образцов наблюдается при номинальных (рабочих) напряжениях, **величина которых значительно меньше**, чем значение допускаемых напряжений в случае статического нагружения.*

Предел выносливости образцов с концентратором ниже, чем без него. Снижение предела выносливости за счет наличия концентраторов напряжений (выточек, отверстий, шпоночных канавок, резких переходов от сечения к сечению) учитывается коэффициентами концентрации напряжений. Эти коэффициенты:

– **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОНЦЕНТРАЦИИ** напряжений  $\alpha_\sigma$  или  $\alpha_\tau$  (индекс указывает напряжение, для которого определяют это коэффициент). Определяется отношением местного напряжения  $\sigma_M$  к номинальному  $\sigma_{ном.}$ :

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_M}{\sigma_{ном.}}. \quad (18.18)$$

Этот коэффициент **учитывает влияние только формы концентратора**. Его величина, как видим, **всегда больше 1**.

Определяется **теоретическими методами** теории упругости, в том числе и с применением метода конечных элементов (МКЭ), который реализуется в различных пакетах прикладных программ.

Используются также **экспериментальные методы**, когда концентрация напряжений для различных концентраторов исследуется на моделях – методы: фотоупругости, муаровых полос, лаковых покрытий, голографии, сеток, а также тензометрированием.

– **ЭФФЕКТИВНЫЙ (ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЙ) КОЭФФИЦИЕНТ КОНЦЕНТРАЦИИ** напряжений  $K_\sigma$  или  $K_\tau$ . Определяется отношением предела выносливости для симметричного цикла образца или детали без концентратора  $\sigma_{-1}$  (лабораторного образца) к пределу выносливости для симметричного цикла образца или детали с концентратором  $\sigma_{-1K}$ :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}}. \quad (18.19)$$

Величина этого коэффициента **зависит не только от формы, но и от материала детали**. Его величина также **всегда больше 1**.

Определяется **экспериментально** – испытанием соответствующих образцов на усталость.

– **КОЭФФИЦИЕНТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТЕРИАЛА К КОНЦЕНТРАЦИИ** напряжений  $q$ . На практике  $K_\sigma$  определяют (и это удобнее) **расчетом**, используя значение  $\alpha_\sigma$  и указанный коэффициент:

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1). \quad (18.20)$$

Значение коэффициент чувствительности материала к концентрации находится в пределах  $0 < q < 1$ . Для **чугуна**  $q \approx 0$ , т.е. он мало чувствителен к концентрации напряжений. Это объясняется особенностями структуры чугуна. Для **малоуглеродистых сталей**  $q \approx 0,5$ , для **высоколегированных сталей**  $q \approx 1$ .

Обычно значение  $q$  определяется **по графику в зависимости от предела прочности материала  $\sigma_B$**  (без учета размеров детали). Если  $\sigma_B$  возрастает, то  $q$  также увеличивается.

Используются также **графические зависимости и таблицы**, которые приводятся в справочной и учебной литературе.

Например, используют **график** в координатах  $\alpha_\sigma - \frac{r}{d}$ ,

где  $r$  – радиус скругления – галтели (рис. 18.16 а) или радиус в вершине концентратора (рис. 18.16 б);

$d$  – характерный размер образца или детали (полуось эллипса или диаметр).

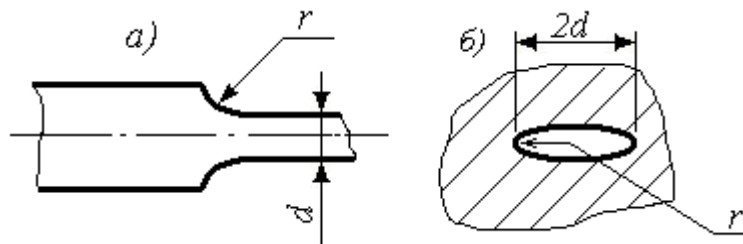


Рис.18.16. Геометрические параметры для определения  $q$

В **таблицах**, например, приводятся значения  $q$  в зависимости от вида деформации, вида и размеров концентратора ( $\alpha_\sigma$ ).

Используются также и т.н. **эмпирические формулы**.

СНИЖЕНИЕ влияния концентрации напряжений на усталостную прочность достигается различными **КОНСТРУКТИВНЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕРОПРИЯТИЯМИ**, о которых речь пойдет ниже.

## 2. Влияние абсолютных размеров детали (масштабный фактор).

Размеры образца, как показали эксперименты, значительно влияют на предел выносливости, т.е. необходимо учитывать масштабный эффект. **С увеличением абсолютных размеров** образца или детали **предел выносливости уменьшается**. Обычно определяют **предел выносливости для симметричного цикла**.

Причины этого влияния разнообразны, и однозначный ответ дать о них достаточно трудно, однако исследователи высказывают следующие предположения:

**а)** в образцах и деталях больших размеров несомненно **присутствие большего количества дефектов**;

**б)** при изготовлении образцов и деталей практически всегда используется **механическая обработка, которая вызывает НАКЛЕП** обрабатываемой поверхности. Наклеп – упрочнение поверхности, вызываемое ее пластическим деформированием при механической обработке. Как будет показано ниже, наклеп увеличивает предел выносливости, причем, для малых образцов наклеп оказывает большее влияние, чем для больших;

**в)** **градиент напряжений** в малых образцах больше – падение напряжений от крайних волокон внутрь материала детали интенсивнее, чем на больших образцах (рис. 18.17).

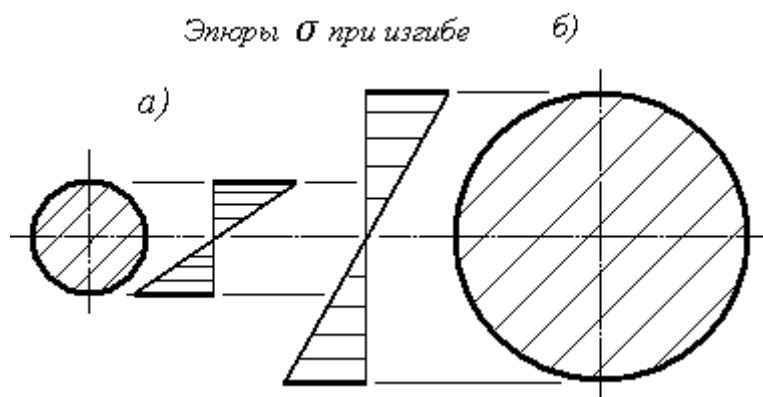


Рис. 18.17. Пример распределения напряжений в образцах малого (а) и большого (б) диаметров при изгибе

Влияние абсолютных размеров на предел выносливости учитывается масштабным коэффициентом  $\beta_M$  – определяется экспериментально, как отношение предела выносливости для симметричного цикла  $\sigma_{-1}$  лабораторного образца ( $\varnothing 7-10$  мм) к пределу выносливости геометрически подобного образца исследуемого размера  $\sigma_{-1d}$ :

$$\beta_{\sigma M} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1d}}. \quad (18.21)$$

Этот коэффициент, естественно, имеет значения  $> 1$ . Иногда этот коэффициент определяют как отношение, обратное (18.21) и обозначают  $\varepsilon_M$ . Тогда его значения по величине будут  $< 1$ . Масштабный эффект проявляется только тогда, когда имеет место значительный градиент напряжений.

На практике, для определения  $\beta_M$  используют соответствующие графики.

### 3. Влияние состояния поверхности.

На величину предела выносливости  $\sigma_{-1}$  существенное влияние оказывает **состояние поверхности детали или образца**. Это объясняется тем, что на поверхности практически всегда имеют место дефекты, связанные с особенностями механической обработки. Необходимо также считаться с влиянием **окружающей среды** и связанного с ней процесса коррозии.

**Плохое качество** поверхности детали или образца **приводит к снижению предела выносливости**, образованию и развитию усталостных трещин и к последующему разрушению. Как правило, **разрушение начинается с поверхности**.

Влияние состояния поверхности, особенностей технологической обработки (механической, термической и т.п.) учитывается коэффициентом  $\beta_{\sigma\Pi}$  – определяется экспериментально, как отношение предела выносливости для симметричного цикла  $\sigma_{-1}$  лабораторного **полированного** образца ( $\varnothing 7-10$  мм) к пределу выносливости геометрически подобного образца с исследуемым поверхностным фактором  $\sigma_{-1\Pi}$ :

$$\beta_{\sigma\Pi} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1\Pi}}. \quad (18.22)$$

Иногда этот коэффициент определяют как отношение, обратное (18.22) и обозначают  $\varepsilon_{\Pi}$ .

В качестве примера, характеризующего влияние чистоты обработки поверхности (**качество поверхности**), приведем график (рис. 18.18).

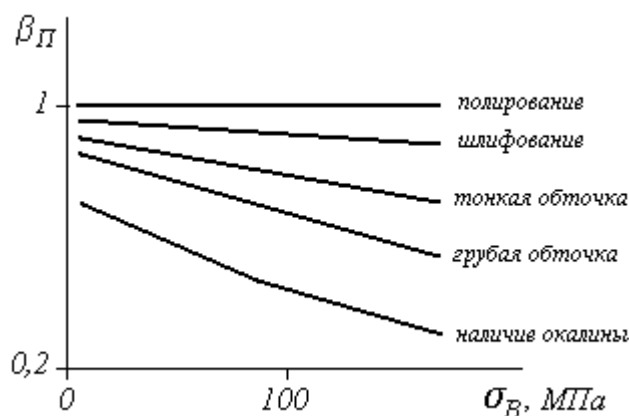


Рис.18.18. Влияние чистоты обработки поверхности на коэффициент  $\beta_{\Pi}$  для материалов с различными значениями предела прочности

Данный коэффициент по величине чаще всего  $> 1$ , однако, его значение может быть и  $\leq 1$ , т.к. разные виды обработки оказывают разное влияние – как положительное, так и отрицательное.

В частности **улучшают характеристики выносливости**, т.е. увеличивается значение  $\beta_{\Pi}$  (его значение приближается к 1):

– обкатка (поверхностно-пластическое деформирование, которое в современных технологиях совмещается с механической обработкой), дробеструйная обработка – **НАКЛЕП**;

– выглаживание, шлифование поверхности;

– азотирование поверхности;

Выносливость снижается, как было сказано, при ухудшении качества обработки, а также, например, при науглераживании поверхности.

Влияют на выносливость и другие особенности:

- паузы (перерывы в нагружении деталей);
- тренировка (постепенное увеличение нагрузки);
- работа некоторое время при напряжении  $< \sigma_{-1}$ , а затем на полную нагрузку;
- температура, при которой эксплуатируется конструкция (в том числе и возможное изменение ее во времени);
- окружающая среда – т.н. коррозионная усталость и т.д.

Все основные факторы при расчетах на усталостную прочность учитываются коэффициентом  $K_{\sigma Д}$  или  $K_{\tau Д}$ :

$$K_{\sigma Д} = K_{\sigma} \beta_{\sigma М} \beta_{\sigma \Pi}, \quad (18.23)$$

или, с учетом комментариев по определению  $\varepsilon_M, \varepsilon_{\Pi}$ :

$$K_{\sigma Д} = \frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma М} \times \varepsilon_{\sigma \Pi}}. \quad (18.24)$$

### 18.7 Особенности расчета на прочность при циклическом нагружении

**Условие прочности при переменных напряжениях.** В соответствии с методом расчета по допускаемым напряжениям, запишем искомое условие прочности. В данном случае опасными будут напряжения, равные пределу выносливости. Тогда **наиболь-**

шие действительные напряжения  $\sigma_{\max}^D$  должны быть с некоторым запасом меньше предела выносливости  $\sigma_r$ :

$$\sigma_{\max}^D \leq \frac{\sigma_r}{n_r}, \quad (18.25)$$

где  $n_r$  – коэффициент запаса для цикла с коэффициентом асимметрии  $r$ .

Для практического применения этого условия необходимо определить предел выносливости и вычислить наибольшие действительные напряжения.

В настоящее время, как было показано ранее, **определение  $\sigma_r$  возможно лишь экспериментальным путем.**

Величина его в основном зависит от:

а) материала; б) типа нагрузки (изгиб, кручение и т.п.); в) значения коэффициента асимметрии (значений максимального и минимального напряжений в цикле).

Кроме того, влияют особенности эксплуатации, размеры деталей, особенности обработки и т.д.

Величина **наибольших действительных напряжений  $\sigma_{\max}^D$**  при действии переменных напряжений, в противоположность действию статических нагрузок, определяется как для у хрупких, так и для пластичных материалов местными напряжениями, при этом необходимо учесть факторы, влияющие на их величину таким образом:

$$\sigma_{\max}^D = K_{\sigma D} \sigma_{\max}, \quad (18.26)$$

или

$$\sigma_{\max}^D = \sigma_M^{\max} = K_{\sigma D} \sigma_{\text{ном.}}^{\max}. \quad (18.27)$$

**На практике чаще расчет на усталость проводят как поверочный расчет, т.е. определяется коэффициент запаса для исследуемого цикла  $n_r$  и сравнивается с допускаемым значением  $[n_r]$ :**

$$n_r \geq [n_r]. \quad (18.28)$$

Допускаемое значение коэффициента запаса берется в пределах  $1,0 \dots 3,0$  или определяется произведением

$$[n_r] = [n_1][n_2][n_3], \quad (18.29)$$

где  $[n_1] = 1,2 \dots 1,5$ . Этим коэффициентом учитывается неточность определения нагрузок и напряжений;

$[n_2]$  – выбирается в зависимости от отношения  $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$ . Коэффициент, учитывает

неоднородность материала, его повышенную чувствительность к недостаткам механической обработки;

$[n_3] = 1,0 \dots 1,5$ . Коэффициент учитывает степень ответственности детали, иначе называется коэффициентом условий работы.

**Коэффициент запаса прочности при переменных напряжениях.** Его величина получается расчетным путем с использованием диаграмм выносливости.

**При симметричном цикле нагружения** по диаграмме Велера определяют  $\sigma_{-1}$  и рассчитывают коэффициент запаса:

$$n_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\max}^D} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D} \sigma_{\text{ном.}}^{\max}}. \quad (18.30)$$

**При несимметричных циклах нагружения** дело обстоит труднее. Обычно используется схематизированная диаграмма предельных амплитуд – диаграмма Хэйга (см. рис. 18.10). Проводят следующие вычисления и геометрические построения (рис. 18.19).

- Вычисляют  $\sigma_m$  и  $\sigma_a$  для данного цикла с коэффициентом асимметрии  $r$ .
- На диаграмме находят точку  $C$  (координаты  $\sigma_m^C$  и  $\sigma_a^C$ ). Причем, значение амплитудного напряжения  $\sigma_a^C$  откладывают с поправкой, учитывающей влияние на предел выносливости рассмотренных выше факторов (см. зависимость 18.24 для  $K_D$ ):

$$\sigma_a^C = \sigma_a K_{\sigma D} = \sigma_a K_{\sigma} \beta_{\sigma M} \beta_{\sigma П}.$$

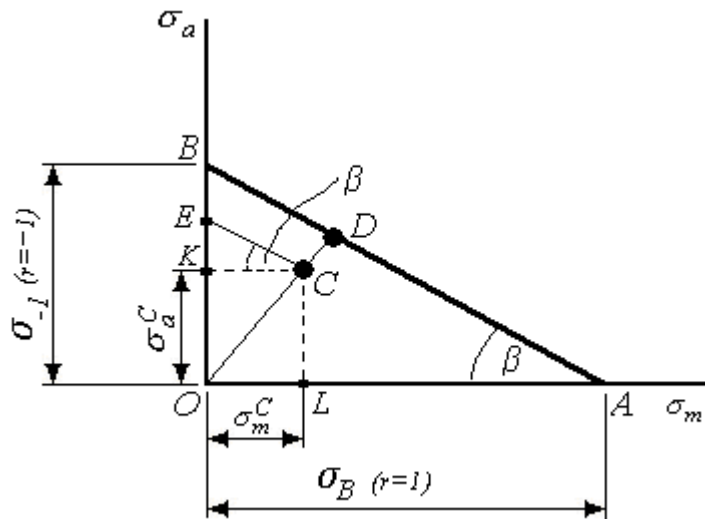


Рис. 18. 19. Определение коэффициента запаса для несимметричного цикла

Тем самым значение амплитудного напряжения  $\sigma_a$  увеличивается на величину коэффициента  $K_{\sigma D}$ . Среднее напряжение  $\sigma_m^C = \sigma_m$ , т.е. его величина равна расчетному значению;

- Проводят луч из начала координат через точку  $C$  до пересечения с линией  $AB$ . Получают точку  $D$ , по которой определяется значение предела выносливости исследуемого цикла:

$$\sigma_r = \sigma_a^D + \sigma_m^D.$$

- Графически определяются значение коэффициента запаса  $n_r$ , как отношение отрезков:

$$n_r = \frac{OD}{OC}.$$

Определим эти отрезки из подобия треугольников  $BDO$  и  $ECO$ :

$$\frac{OD}{OC} = \frac{OB}{OE}.$$

Соответствующие отрезки будут равны:

$$OB = \sigma_{-1}; \quad OE = OK + KE; \quad OK = \sigma_a^C = \sigma_a K_\sigma \beta_{\sigma M} \beta_{\sigma \Pi}.$$

Из треугольника  $KCE$ :

$$\operatorname{tg} \beta = \left( \frac{KE}{KC} \right).$$

Отрезок  $KC$  равен  $\sigma_m^C$ , тогда

$$KE = \sigma_m^C \operatorname{tg} \beta.$$

С другой стороны:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{OB}{OA} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}, \text{ а также (для сведения) } \operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{1-r}{1+r}.$$

Тогда, после преобразований получим выражение для коэффициента запаса:

$$n_{\sigma r} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_\sigma \beta_{\sigma M} \beta_{\sigma \Pi} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \sigma_m}. \quad (18.31)$$

В случае совместного действия нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений (например, при совместном действии изгиба с кручением) **общий коэффициент запаса** определится по формуле:

$$\frac{1}{n_r^2} = \frac{1}{n_{\sigma r}^2} + \frac{1}{n_{\tau r}^2}. \quad (18.32)$$

Значения напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  определяются в опасной точке сечения.

### 18.8 Повышение выносливости конструктивными и технологическими мероприятиями

Выше было рассмотрено влияние различных факторов на выносливость, которое определяется посредством коэффициентов:  $K_\sigma$  ( $K_\tau$ ),  $\beta_M$ ,  $\beta_\Pi$  и других. В соответствии с их влиянием применяются различные мероприятия, которые условно подразделяются на конструктивные и технологические.

#### Конструктивные мероприятия.

При проектировании деталей, узлов и конструкций конструктор должен стремиться **в первую очередь к снижению влияния концентрации напряжений** (к снижению величины  $K_\sigma$ ), которые вызываются всякого рода:

- резкими изменениями очертания деталей и резкими переходами от одного сечения к другому (рис. 18.20 а);
- расположением и размерами отверстий;
- расположением, размерами сварных швов и конструкцией сварных соединений;
- другими особенностями конструкции.

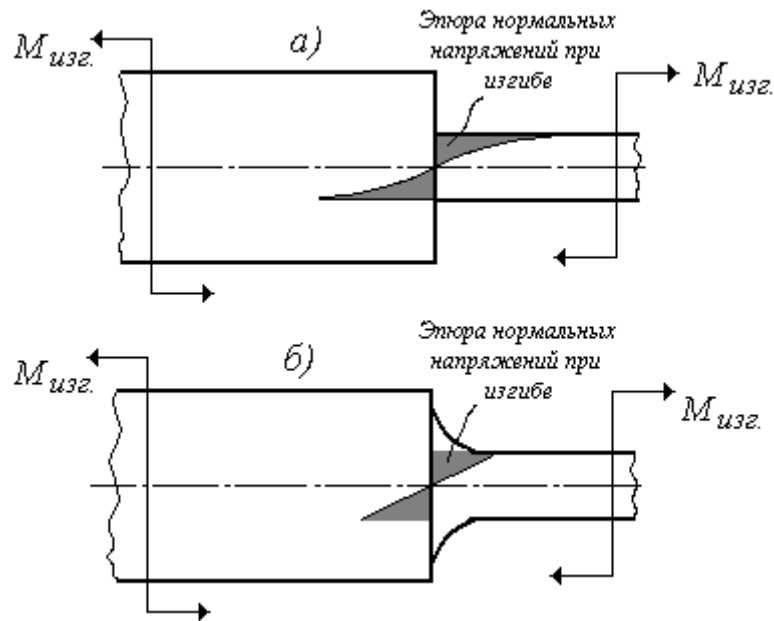


Рис. 18.20. Местные напряжения в зоне резкого изменения размеров бруса при действии изгибающих моментов (а), снижение напряжений при выполнении плавного перехода (б)

Концентрация напряжений изучается (как было сказано ранее) специалистами разных отраслей, с учетом особенностей конструкций и условий их эксплуатации.

**Рекомендации сводятся к обеспечению плавных очертаний переходов к сечениям других размеров, выемок, подрезов, переходов от катетов швов к основному металлу, оптимизации размеров (радиуса) галтелей:** переход по радиусу, достаточному для существенного снижения  $K_{\sigma}$  (рис. 18.20 б).

Например: известен случай **большого количества изломов** коленчатых валов авиадвигателей (Англия) **по галтели в месте посадки пропеллера**. Стоило конструкторам увеличить радиус галтели всего на 3 мм и изломы прекратились. Это произошло за счет снижения  $K_{\sigma}$  (смягчения его).

Большая жесткость детали также приводит к снижению усталостной прочности. Поэтому необходимо, по возможности снижать жесткость, на этом основана идея разгружающих надрезов и так называемых «выкружек» (рис. 18.21). Конечно, при этом должен быть обеспечен оптимальный радиус, чтобы был малый  $K_{\sigma}$ .

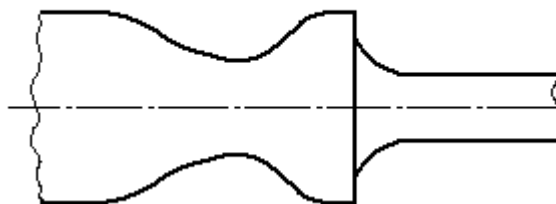


Рис. 18.21. Вид разгружающего надреза – «выкружки»

В процессе проектирования необходимо также учитывать и влияние масштабного фактора – оптимизация размеров деталей и всей конструкции (стремиться к снижению  $\beta_M$ ).

#### **Технологические мероприятия.**

Эти мероприятия направлены на:



- снижение концентрации напряжений при обработке;
- повышение качества обработки поверхностей, т.е. снижение  $\beta_{II}$ ;
- обеспечение получения материалов без дефектов или с минимальным их присутствием;
- оптимизацию процессов химико-термической обработки;
- проектирование и выполнение сварочных и сборочных операций с целью снижения вероятности появления дефектов, концентрации напряжений, а также снижения уровня остаточных напряжений.

**Рекомендации сводятся к обеспечению качества обработки поверхностей, (лучше всего шлифование или полирование), упрочнению (наклеп с применением методов ШПД), химико-термическая обработка (азотирование, электрохимические покрытия при работе в коррозионной среде).**

**Особо следует отметить необходимость учета свойств применяемого материала** (лучше металл с высокими значениями  $\sigma_B$  и пластичностью, следовательно, будут иметь место высокие значения  $\sigma_r$ ). Материал должен быть без внутренних дефектов: структура лучше мелкозернистая, однородная; должны, по возможности, отсутствовать остаточные напряжения. В этом плане особое место занимают сварные детали: коленчатые валы, роторы турбин (большая вероятность трещин, необходимость сварки разнородных материалов). Чем больше  $\sigma_B$ , тем больше значение коэффициента чувствительности  $q$ , поэтому такие стали **необходимо тщательнее обрабатывать**, по сравнению с углеродистыми сталями.

**Возможности снижения уровня упруго-пластических деформаций и повышения долговечности рабочих поверхностей при их термоциклировании.**

Особое место в исследованиях и при эксплуатации занимает так называемая термическая усталость. Впервые это явление исследовал русский инженер (металловед и металлург) Чернов. Он наблюдал и исследовал разрушение внутренних поверхностей орудийных стволов после определенного количества выстрелов и назвал этот процесс – «разгар». Термин **«термическая усталость»** ввел в 50-х годах XX века русский инженер Гликман. Это явление наблюдается при эксплуатации энергетических и химических установок, в металлургии (литье, прессование, прокатка, резка горячего металла).

Этому явлению посвящено много работ, в частности, см. монографию под ред. Павлюка С.К., Кузменко И.М. «Упрочнение деталей, контактирующих с расплавами металлов», Мн., «Навука і тэхніка», 1993.

Основное влияние на стойкость против термической усталости оказывает температура эксплуатации и ее циклическое изменение во времени (**температурный режим, форма и длительность термического цикла, жесткость нагружения**). Термическая усталость является разновидностью малоцикловой усталости. В связи с тем, что узлы машин и установок в процессе их нагрева и последующего охлаждения не могут свободно деформироваться (имеет место **стесненная термическая деформация, неравномерность нагрева или охлаждения тела**), в материале деталей возникают термические напряжения – при нагреве напряжения сжатия, а при охлаждении – растяжения. Величина напряжений превышает предел упругости и наблюдаются упруго-пластические деформации материала, имеющие достаточно высокие значения.

Накопление и развитие повреждений при термической усталости происходит более активно, чем при механической усталости (даже при повышенной, но постоянной температуре).