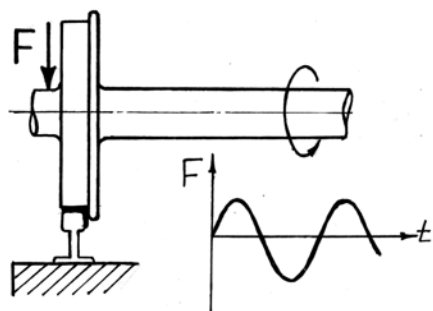


22. ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ МЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ

22.1. Понятие об усталости материалов



К динамическим нагрузкам, несмотря на отсутствие значительных инерционных сил, можно отнести периодические многократно повторяющиеся (циклические) нагрузки, действующие на элементы конструкции. Такого рода нагружения характерны для большинства машиностроительных конструкций, таких, как оси, валы, штоки, пружины, шатуны и т. д.

Как показывает практика, нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине или по величине и по

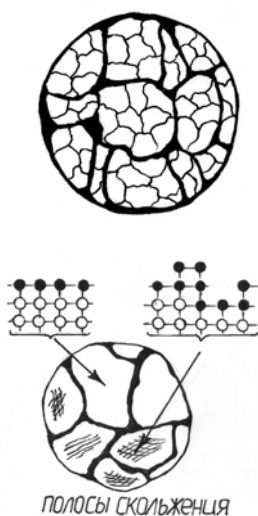
знаку, могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести (или предел прочности). Такое разрушение принято называть «усталостным». Материал как бы «устает» под действием многократных периодических нагрузок.

Усталостное разрушение – разрушение материала под действием повторно-переменных напряжений.

Усталость материала – постепенное накопление повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к образованию трещин в материале и разрушению.

Выносливость – способность материала сопротивляться усталостному разрушению.

Физические причины усталостного разрушения материалов достаточно сложны и еще не до конца изучены. Одной из основных причин усталостного разрушения принято считать образование и развитие трещин.



Механизм усталостного разрушения во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (различие размеров, очертаний, ориентации соседних зерен металла; наличие различных включений – шлаков, примесей; дефекты кристаллической решетки, дефекты поверхности материала – царапины, коррозия и т. д.). В связи с указанной неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений, которая приводит:

к микропластическим деформациям сдвига некоторых зерен металла (при этом на поверхности зерен могут появляться полосы скольжения) и накоплению сдвигов (кото-

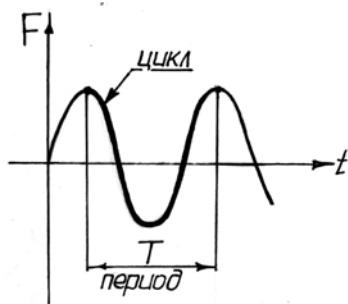
рое на некоторых материалах проявляется в виде микроскопических бугорков и впадинок – экструзий и интрузий);



затем происходит развитие сдвигов в микротрещины, их рост и слияние; на последнем этапе появляется одна или несколько макротрещин, которая достаточно интенсивно развивается (растет). Края трещины под действием переменной нагрузки притираются друг об друга, и поэтому зона роста трещины отличается гладкой (полированной) поверхностью. По мере роста трещины поперечное сечение детали все больше ослабляется, и наконец происходит внезапное хрупкое разрушение детали, при этом зона хрупкого долома имеет грубозернистую кристаллическую структуру (как при хрупком разрушении).

22.2. Основные характеристики циклического нагружения. Виды циклов нагружения

Усталостная прочность материалов при повторно-переменном нагружении во многом зависит от характера изменения напряжений во времени. При этом далее будем изучать периодические нагрузки.



Периодическая нагрузка – переменная нагрузка с установившимся во времени характером изменения, значения которой повторяются через определенный промежуток (п е р и о д) времени.

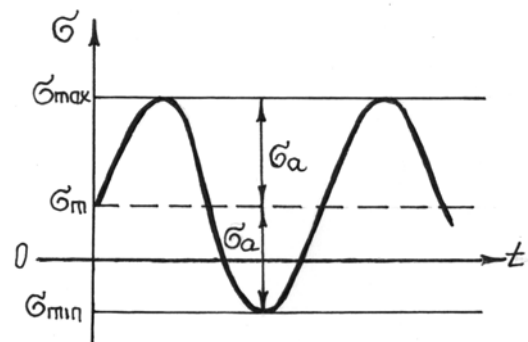
Цикл напряжений – совокупность всех значений переменных напряжений за время одного периода изменения нагрузки.

Цикл напряжений может описываться любым периодическим законом, чаще всего – синусоидальным. Однако прочность материала при циклическом нагружении зависит не от закона изменения напряжений во времени, а в основном от значений **на и б о л ь ш е г о** (максимального, σ_{max}) и **на и м е н ь ш е г о** (минимального, σ_{min}) напряжений в цикле.

Обычно цикл напряжений характеризуется двумя независимыми из следующих основных характеристик (п а р а м е т р о в цикла):

σ_{max} – максимальное напряжение цикла (наибольшее в алгебраическом смысле напряжение цикла);

σ_{min} – минимальное напряжение цикла



(наименьшее в алгебраическом смысле напряжение цикла);

σ_m – среднее напряжение цикла (полусумма наибольшего и наименьшего напряжений цикла)

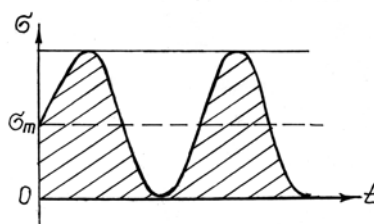
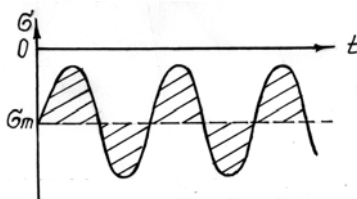
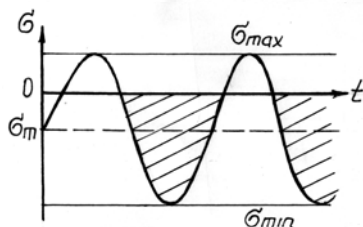
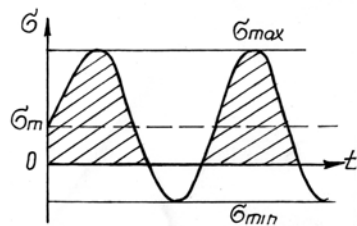
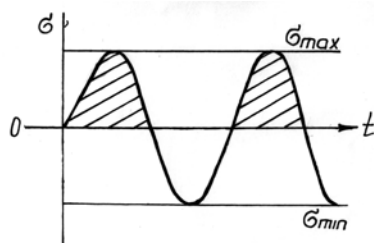
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2};$$

σ_a – амплитудное напряжение цикла (полуразность наибольшего и наименьшего напряжений цикла)

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

R – коэффициент асимметрии цикла напряжений (отношение наименьшего и наибольшего напряжений цикла)

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}.$$



В зависимости от величины перечисленных характеристик циклы напряжений могут быть подразделены на следующие основные типы:

симметричный цикл – максимальное и минимальное напряжения равны по абсолютной величине и противоположны по знаку

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min}, R = -1;$$

асимметричный цикл – максимальное и минимальное напряжения не равны по абсолютной величине ($\sigma_{max} \neq -\sigma_{min}$), при этом асимметричный цикл может быть знакопеременным или знакостоянным;

знакопеременный цикл – максимальное и минимальное напряжения не равны по абсолютной величине и противоположны по знаку ($\sigma_{max} \neq -\sigma_{min}$, $R < 0$, $R \neq -1$);

знакостоянный цикл – максимальное и минимальное напряжения не равны по абсолютной величине и имеют одинаковый знак ($\sigma_{max} \neq -\sigma_{min}$, $R > 0$, $R \neq 1$);

отнулевой (пульсирующий) цикл – максимальное или минимальное напряжения равны нулю ($\sigma_{min} = 0$ или $\sigma_{max} = 0$, $R = 0$ или $R = \infty$);

Циклы с одинаковым коэффициентом асимметрии R называют подобными. R меняется от $+\infty$ до -1 .

22.3. Кривая усталости (кривая Вёлера). Предел выносливости

Теперь, в дополнение к уже известным нам механическим характеристикам материала, введем некоторые новые, связанные со спецификой циклического нагружения. Эти характеристики могут быть определены путем специально поставленных экспериментов – испытаний на усталость (выносливость).

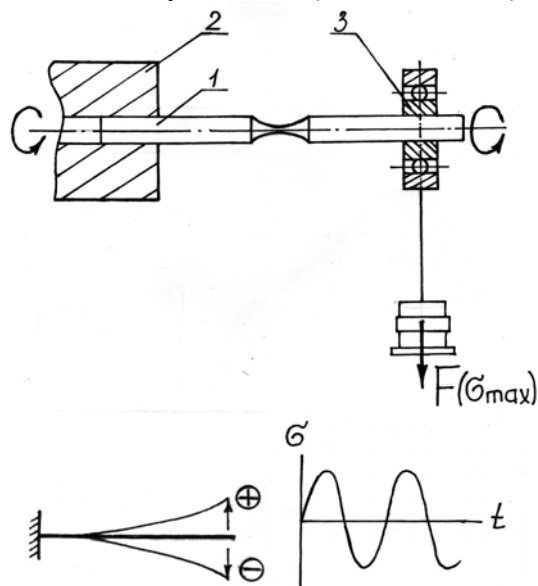
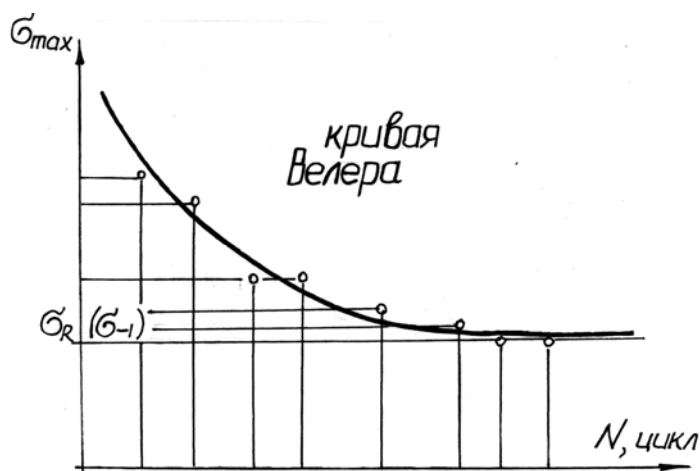


Схема простейшей машины для испытаний на усталость выглядит следующим образом: образец 1 устанавливается в патроне 2 машины, который вращается с определенной скоростью; на другом конце образца устанавливается подшипник 3, через который передается поперечная сила F , изгибающая образец. При вращении образца в его наружных волокнах будут возникать то растягивающие, то сжимающие напряжения (симметричный цикл). Такое циклическое нагружение приводит, в конце концов, к разрушению образца, после чего машина автоматически оста-

навливается, а специальный счетчик фиксирует число циклов (число оборотов образца) до разрушения образца.

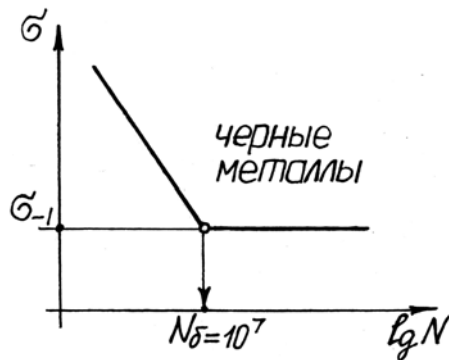
Обработка результатов усталостных испытаний обычно сопровождается построением кривой усталости¹. Кривую усталости строят по точкам в координатах: число циклов N – максимальное по модулю напряжение $\sigma = \sigma_{max}$ или в координатах $(\sigma, \lg N)$, $(\lg \sigma, \lg N)$. Каждому разрушившемуся образцу на диаграмме соответствует одна точка с координатами N (число циклов до разрушения данного образца) и σ_{max} (максимальное по абсолютной величине напряжение цикла при испытании).



Кривая усталости показывает, что с увеличением числа цикла максимальное напряжение, при котором происходит разрушение материала, значительно уменьшается. При этом для многих материалов, например углеродистой стали, можно установить такое наибольшее напряжение цикла, при котором образец не разрушается после любого числа

¹ Кривая усталости часто называется кривой Вёлера – по имени немецкого ученого, инженера, создавшего одну из первых машин для испытаний на усталость и ставшего основоположником учения об усталости материалов.

циклов (горизонтальный участок диаграммы), называемое пределом выносливости (σ_R).



Предел выносливости (усталости) σ_R – наибольшее (предельное) напряжение цикла, при котором не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов.

Обозначение предела выносливости для симметричного цикла – σ_{-1} , для отнулевого – σ_0 .

Так как испытания нельзя проводить бесконечно большое время, то число циклов ограничивают некоторым пределом, который называют базовым числом циклов. В этом случае, если образец выдерживает базовое число циклов, то считается, что напряжение в нем не выше предела выносливости.



Для черных металлов базовое число циклов $N_0=10^7$.

Кривые усталости для цветных металлов не имеют горизонтальных участков. Поэтому для них база испытаний увеличивается до $N_0=10^8$ и устанавливается предел ограниченной выносливости (σ_{-1N}) для данной базы испытаний.

22.4. Предел выносливости при асимметричном цикле

Испытания при симметричном цикле (при $R=-1$) оказываются наиболее простыми с точки зрения их реализации. Однако в реальных конструкциях подавляющее число деталей работает при асимметричном нагружении. Поэтому, чтобы обеспечить корректность расчета, необходимы сведения о пределах выносливости для любой асимметрии цикла.

В расчетной практике обычно пользуются двумя типами диаграмм: диаграммой предельных напряжений и диаграммой предельных амплитуд.

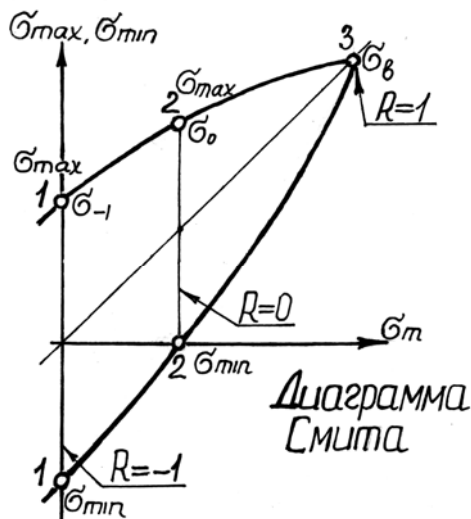


Диаграмма предельных напряжений [диаграмма Смита (Smith)]

Диаграмма Смита строится, как минимум, по трем режимам нагружения (по трем точкам), для каждого из которых определяют предел выносливости σ_R :

первый режим (точка 1) – обычный симметричный цикл нагружения ($R=-1$, $\sigma_m=0$,

$\sigma_{max}=\sigma_{-1}$, $\sigma_{min}=-\sigma_{-1}$);

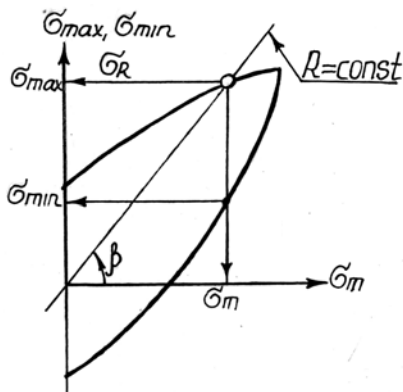
второй режим (точка 2) – асимметричный цикл, как правило, отнулевой ($R=0$, $\sigma_m=\sigma_0/2$, $\sigma_{max}=\sigma_0$, $\sigma_{min}=0$);

третий режим (точка 3) – простое статическое растяжение ($R=1, \sigma_{max}=\sigma_{min}=\sigma_m=\sigma_B$).

Полученные точки соединяем плавной линией (1–2–3), ординаты точек которой соответствуют пределам выносливости материала при различных значениях коэффициента асимметрии цикла.

Легко показать, что луч, проходящий под углом β через начало координат диаграммы предельных напряжений, характеризует циклы с одинаковым коэффициентом асимметрии R :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2 \cdot \sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{2}{1 + R}.$$

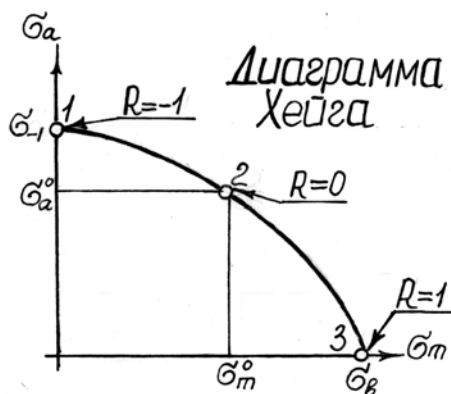


Тогда, для определения предела выносливости при заданной асимметрии цикла R нужно по приведенной формуле вычислить величину угла β и провести луч под этим углом до пересечения с линией 1–2–3, ордината точки пересечения и даст нам искомый предел выносливости σ_R .

Опуская перпендикуляр на ось абсцисс, найдем среднее напряжение цикла σ_m , а на пересечении перпендикуляра со второй ветвью диаграммы – минимальное напряжение σ_{min} .

Диаграмма предельных амплитуд [диаграмма Хейга (Haigh)]

Диаграмма Хейга строится в координатах: среднее напряжение цикла σ_m – амплитуда цикла σ_a . При этом для ее построения необходимо провести усталостные испытания так же, как минимум, для трех режимов:

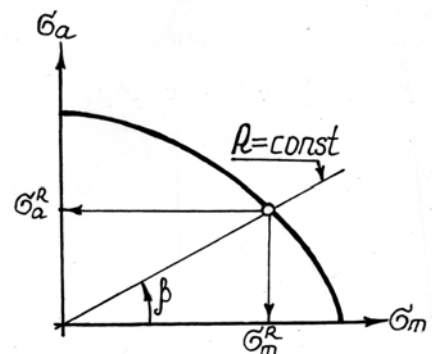


1 – симметричный цикл нагружения ($R=-1, \sigma_a=\sigma_{-1}, \sigma_m=0$); 2 – отнулевой цикл ($R=0, \sigma_a=\sigma_m=\sigma_0/2$); 3 – статическое растяжение ($R=1, \sigma_a=0, \sigma_m=\sigma_B$). Соединяя экспериментальные точки (1, 2, 3) плавной кривой, получим график, характеризующий зависимость между значениями предельных амплитуд и значениями предельных средних напряжений в цикле.

Здесь также можем провести луч, характеризующий циклы с одинаковой асимметрией:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{1 - R}{1 + R}.$$

Тогда, для определения предела выносливости при заданной асимметрии цикла R нужно по приведенной формуле вычислить величину угла β и провести луч под этим углом до пересечения



с линией 1-2-3, ордината точки пересечения даст нам величину предельной амплитуды σ_a и значение предельного среднего напряжения σ_m в цикле. Предел выносливости σ_R найдем в виде

$$\sigma_R = \sigma_m + \sigma_a.$$

22.5. Факторы, влияющие на усталостную прочность материалов

На величину предела выносливости образцов и деталей, изготовленных из одного и того же материала, кроме характеристик цикла нагружения влияет целый ряд различных факторов. Многочисленные эксперименты, проведенные с образцами различных форм и размеров, а также практика эксплуатации деталей машин показывают, что предел выносливости конкретной детали в значительной степени зависит от ее формы и размеров, от состояния поверхности и других обстоятельств.

Стандартные испытания на выносливость проводят на специальных лабораторных образцах диаметром 5...10 мм, имеющих строго цилиндрическую форму рабочей части и высокую чистоту поверхности. Очевидно, что предел выносливости реальной детали, изготовленной из того же материала, будет заметно отличаться от предела выносливости лабораторного образца.

Падение предела выносливости конкретной детали ($\sigma_{-1д}$) по сравнению с пределом выносливости лабораторного образца (σ_{-1}) учитывается в расчетах при помощи коэффициента K , который называется коэффициентом снижения предела выносливости и отражает влияние основных факторов на сопротивление усталости:

$$\sigma_{-1д} = \frac{\sigma_{-1}}{K}.$$

Коэффициент K рекомендуется (ГОСТ 25.504–82) определять по следующей формуле:

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_A}.$$

Коэффициенты, входящие в выражение для K , учитывают влияние на усталостную прочность следующих факторов:

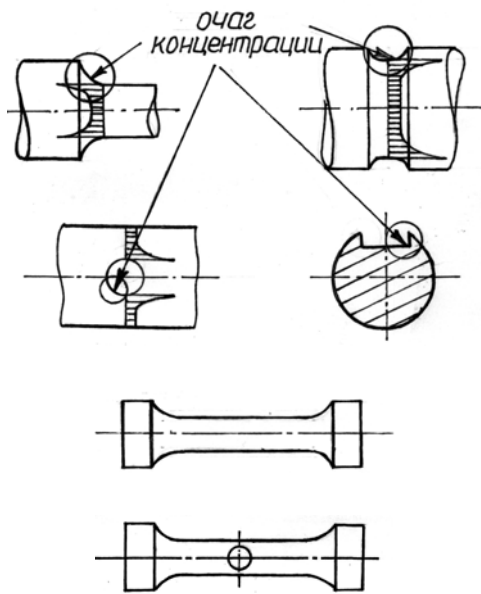
- концентрация напряжений (K_σ);
- масштабный фактор, то есть влияние абсолютных размеров детали ($K_{d\sigma}$);
- качество обработки поверхности ($K_{F\sigma}$);
- эксплуатационные факторы (температура, коррозия, частота нагружения, радиационное облучение и т. д.);
- наличие поверхностного слоя, упрочненного различными технологическими методами (K_V);
- анизотропия (неоднородность) прочностных свойств материала (K_A).

Далее коротко рассмотрим влияние данных факторов на предел выносливости и способы определения соответствующих коэффициентов.

Влияние концентрации напряжений

Концентрация напряжений, вызванная резким изменением сечения детали, представляется наиболее важным фактором, снижающим предел выносливости. На практике concentra-

торами напряжений являются шпоночные канавки, отверстия в детали, выточки, нарезки на поверхности, резьбы, малые радиусы закругления в местах резкого изменения размеров детали и т. д. Концентрация напряжений при циклическом нагружении вызывает в зоне очага концентрации зарождение и рост усталостной трещины и последующее усталостное разрушение материала.



Влияние концентраторов напряжений на предел выносливости учитывается эффективным (действительным) коэффициентом концентрации напряжений, который представляет собой отношение предела выносливости образца без концентрации напряжений к пределу выносливости образца тех же размеров, но с концентратором напряжений:

$$K_{\sigma} = \sigma_{-1} / \sigma_{-1к}$$

Эффективные коэффициенты концентрации обычно устанавливаются экспериментальным путем, однако при отсутствии опытных данных для их вычисления можно пользоваться следующими формулами:

$$K_{\sigma} = 1 + q \cdot (a_{\sigma} - 1),$$

где q – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений, который зависит от свойств материала: чем хрупче материал, тем чувствительнее он к концентрации напряжений, тем больше величина q (для высокопрочных сталей $q \approx 1$; для углеродистых сталей $q = 0,6 \dots 0,8$; для чугуна $q \approx 0$ – из-за наличия внутренних концентраторов в виде включений графита); a_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который зависит только от формы концентратора, определяется либо расчетным путем (методами теории упругости), либо экспериментально (тензометрией, оптическими методами и т. д.) и приводится в справочных таблицах.

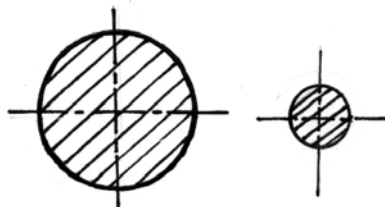
В последнее время применяется более современная методика расчета коэффициента K_{σ} (ГОСТ 25.504–82), согласно которой

$$K_{\sigma} = a_{\sigma} / n, \quad n = 1 + \sqrt{G} \cdot 10^{-(0,33 + \sigma_T / 712)},$$

где G – относительный градиент (перепад) напряжений (мм^{-1}), который (как и a_{σ}) определяется расчетным или опытным путем и приводится в справочниках; σ_T – предел текучести материала (МПа).

Влияние масштабного фактора

Экспериментально установлено, что с увеличением размеров образца его предел выносливости уменьшается. При этом в качестве причин проявления масштабного фактора можно указать следующие: 1) статистический фактор – большая вероятность появления дефектов



в структуре образцов больших размеров; 2) технологический фактор – ухудшение структуры и свойств поверхностного слоя при механической обработке крупногабаритных деталей; 3) металлургический фактор – ухудшение качества

заготовки с увеличением ее размеров (литейные дефекты, дефектыковки и т. д.).

Влияние абсолютных размеров детали на предел выносливости материала учитывается масштабным коэффициентом, который представляет собой отношение между пределом выносливости σ_{-1} лабораторных образцов (диаметром 6...10 мм) и пределом выносливости геометрически подобных образцов (или деталей) больших размеров σ_{-1d} , то есть

$$K_{d\sigma} = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1}.$$

Масштабные коэффициенты устанавливаются экспериментальным путем, при отсутствии опытных данных для их вычисления рекомендуется пользоваться следующими формулами:

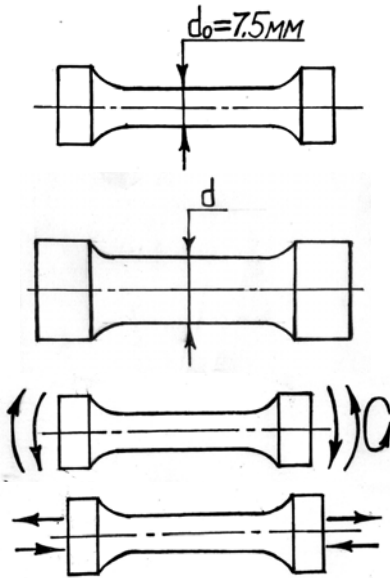
$$K_{d\sigma} = 1 - (1 - \sigma_{-1}^p / \sigma_{-1}) \cdot 0,77 \cdot \lg(d/d_0), \text{ при } d \leq 150 \text{ мм};$$

$$K_{d\sigma} = \sigma_{-1}^p / \sigma_{-1}, \text{ при } d > 150 \text{ мм},$$

где σ_{-1} – предел выносливости лабораторного образца диаметром $d_0 = 7,5$ мм при циклическом изгибе с вращением;

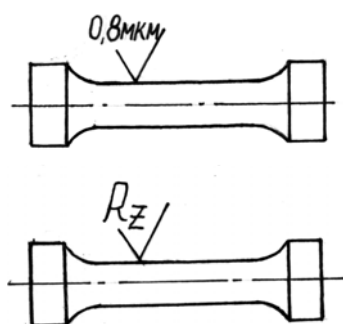
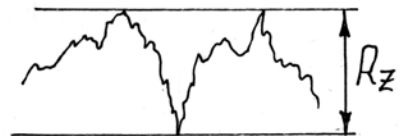
σ_{-1}^p – предел выносливости лабораторного образца диаметром $d_0 = 7,5$ мм при циклическом растяжении-сжатии;

d – диаметр рассчитываемой детали (образца).



Влияние качества обработки поверхности

Усталостные трещины, как правило, начинаются от поверхности детали. Поэтому состояние поверхностного слоя оказывает существенное влияние на прочность при переменных напряжениях. Микронеровности (риски, шероховатость) от механической обработки, повреждения поверхности (царапины, прижоги) и т. п. являются источниками концентрации напряжений и могут вызвать весьма значительное снижение предела выносливости.



Влияние качества поверхности на предел выносливости материала учитывается коэффициентом качества поверхности, который представляет собой отношение между пределом выносливости σ_{-1} лабораторных образцов с полированной поверхностью и пределом выносливости геометрически подобных образцов с заданной шероховатостью $\sigma_{-1(R_z)}$, то есть

$$K_{F\sigma} = \sigma_{-1(R_z)} / \sigma_{-1}.$$

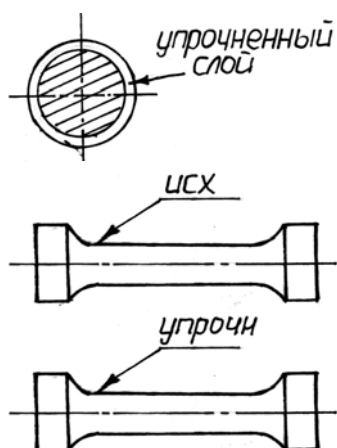
При отсутствии опытных данных для вычисления $K_{F\sigma}$ рекомендуется пользоваться следующими формулами:

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,22 \cdot (\lg(\sigma_b/20) - 1) \cdot \lg R_z, \text{ при } R_z > 1 \text{ мкм};$$

$$K_{F\sigma} = 1, \text{ при } R_z \leq 1 \text{ мкм},$$

$\sigma_{-1(Rz)}$ – предел выносливости образца с шероховатостью Rz .

влияние методов поверхностного упрочнения



Применение методов поверхностного упрочнения приводит в ряде случаев к значительному повышению пределов выносливости (в 2–3 раза и более), что связано с формированием в поверхностном слое упрочненной детали сжимающих остаточных напряжений и повышением твердости поверхности.

Повышение предела выносливости вследствие поверхностного упрочнения характеризуется коэффициентом

$$K_V = \sigma_{-1(\text{упр})} / \sigma_{-1}$$

$\sigma_{-1(\text{упр})}$ – предел выносливости упрочненного образца.

22.6. Поверочный расчет при циклическом нагружении

В большинстве случаев расчеты на прочность деталей, работающих при переменных напряжениях, выполняют как *п о в е р о ч н ы е*, то есть проверяется запас циклической прочности готовой детали. При этом проектировочный расчет детали, служащий для определения ее размеров, выполняется приближенно без учета переменности напряжений, но по пониженным допускаемым напряжениям.

При поверочном расчете определяют коэффициенты запаса прочности для одного или нескольких предположительно опасных сечений готовой детали, а затем сравнивают эти коэффициенты с допускаемыми. В этом случае условие прочности при поверочном расчете выглядит следующим образом:

$$n \geq [n].$$

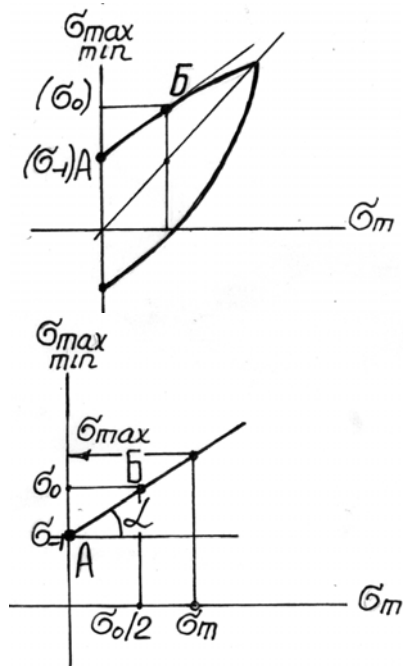
Величина допускаемого коэффициента запаса прочности зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются: 1) достоверная точность определения усилий и напряжений; 2) однородность структуры материала; 3) технология и культура изготовления детали; 4) условия работы детали и степень ее ответственности.

В зависимости от этих условий можно выделить три группы значений допускаемого коэффициента запаса прочности при расчетах на выносливость:

1-я группа $[n]=1,3\dots1,5$ – назначается при повышенной точности теоретического и экспериментального определения усилий и напряжений для деталей, изготовленных из однородного материала при качественной технологии и высокой культуре производства;

2-я группа $[n]=1,5\dots2$ – назначается при недостаточно полном объеме экспериментальной информации о нагрузках и прочности детали, при среднем уровне технологии изготовления, но в условиях систематического дефектоскопического контроля;

3-я группа $[n]=2...3$ – назначается при малом объеме или отсутствии экспериментальной информации и низком уровне производства.



Рассмотрим процедуру определения коэффициентов запаса прочности с использованием диаграммы Смита.

С достаточной степенью точности диаграмму предельных напряжений, построенную для лабораторного образца, можно аппроксимировать прямой линией, проходящей через две точки – точку А, соответствующую пределу выносливости при симметричном цикле $(0, \sigma_{-1})$, и точку В, соответствующую пределу выносливости при отнулевом цикле $(\sigma_0/2, \sigma_0)$, уравнение которой запишется в следующем виде:

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где σ_m – текущие средние напряжения цикла; σ_{max} – текущие предельные напряжения цикла;

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_0 - \sigma_{-1}}{\sigma_0/2}.$$

Тогда можем записать

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + \left(1 - \frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}\right) \cdot \sigma_m.$$

Введем понятие коэффициента влияния асимметрии цикла:

$$\psi_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}.$$

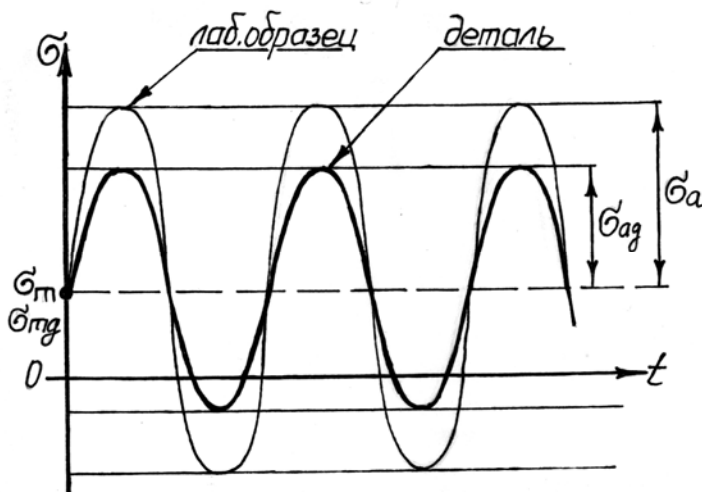
Тогда предельные напряжения цикла найдем следующим образом:

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + (1 - \psi_\sigma) \cdot \sigma_m.$$

В этом случае предельная амплитуда напряжений для лабораторных образцов может быть определена так

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \cdot \sigma_m.$$

Предельная амплитуда цикла для реальной детали $\sigma_{ад}$, очевидно, отличается от предельной амплитуды σ_a для лабораторного образца в K раз (для одного и того же среднего напряжения цикла, то есть при $\sigma_m = \sigma_{мд}$):



$$\sigma_{ад} = \frac{\sigma_a}{K} = \frac{\sigma_{-1} - \psi_{\sigma} \cdot \sigma_{мд}}{K} = \sigma_{-1д} - \psi_{\sigmaд} \cdot \sigma_{мд},$$

где $\psi_{\sigmaд} = \psi_{\sigma}/K$, $\sigma_{-1д} = \sigma_{-1}/K$ – соответственно коэффициент влияния асимметрии цикла и предел выносливости рассчитываемой детали.

Под коэффициентом запаса прочности будем понимать отношение предельных значений напряжений для данной детали к рабочим (действующим в реальных условиях эксплуатации), а именно

$$n_{\sigma} = \sigma_{ад} / \sigma_a^{раб} = \sigma_{мд} / \sigma_m^{раб} = \sigma_{maxд} / \sigma_{max}^{раб}.$$

То есть n_{σ} показывает во сколько раз рабочие напряжения, возникающие в детали в ходе ее эксплуатации, меньше предельно допустимых для данной детали величин циклических напряжений.

В этом случае можем записать

$$n_{\sigma} \cdot \sigma_a^{раб} = \frac{\sigma_{-1} - \psi_{\sigma} \cdot (n_{\sigma} \cdot \sigma_m^{раб})}{K},$$

отсюда

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{K \cdot \sigma_a^{раб} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m^{раб}}.$$

Если деталь подвергается действию циклических касательных напряжений (например, при кручении), коэффициент запаса выносливости найдем по аналогии

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{K \cdot \tau_a^{раб} + \psi_{\sigma} \cdot \tau_m^{раб}}.$$

При одновременном действии и нормальных, и касательных напряжений (при плоском напряженном состоянии) коэффициент запаса выносливости найдем в виде

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}.$$