

Сопротивление усталости. Прочность при динамических нагрузках

Динамические нагрузки подразделяются на повторно-переменные, ударные, внезапно приложенные и инерционные.

В этой теме рассмотрим *повторно-переменные нагрузки*, которые вызывают периодически изменяющиеся напряжения и деформации.

Сопротивление деталей действию таких нагрузок существенно отличается от их сопротивления при статическом нагружении.

Повторно-переменным нагрузкам подвергаются, например, вращающиеся оси, валы, зубчатые колеса и т. п.

При вращении вала одни и те же волокна оказываются то в растянутой, то в сжатой зоне, т. е. подвергаются деформациям растяжения-сжатия.

Анализ поломок деталей машин показывает, что материалы длительное время подвергавшиеся действию переменных нагрузок, могут разрушаться при напряжениях более низких, чем предел прочности и даже предел текучести.

Разрушение при этом происходит вследствие *усталости материала*.

Усталостью называется процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению.

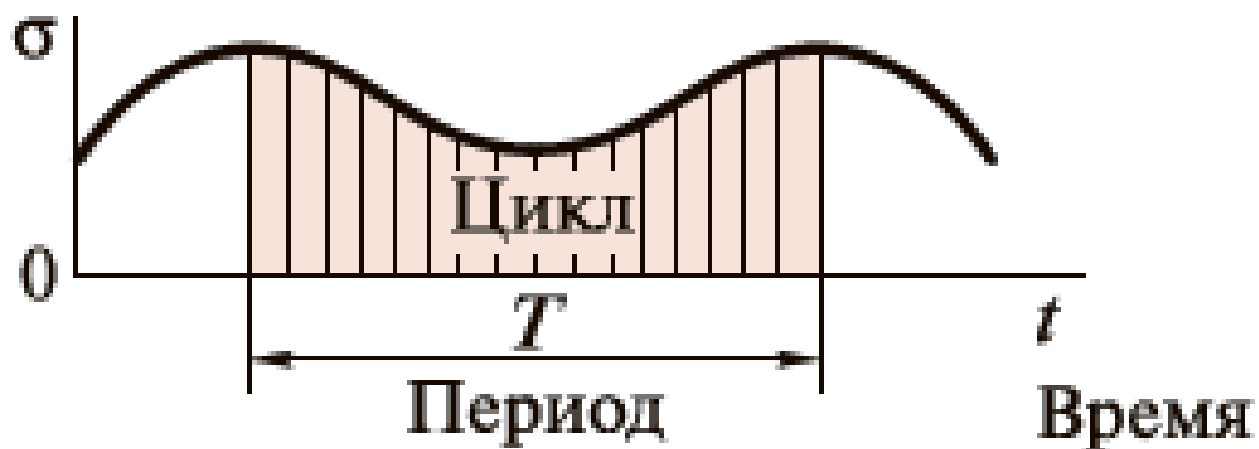
Причины усталостного разрушения заключаются в появлении микротрещин из-за неоднородности строения материала, следов механической обработки и повреждений поверхности детали (волосовины, раковины, газовые и шлаковые включения, следы резца или шлифовального камня и т. п.), а также в результате концентрации напряжений.

Способность материалов противостоять усталости называется *сопротивлением усталости*.

Изучение этого вопроса имеет очень большое значение, поскольку такие ответственные детали, как валы, поршневые пальцы, оси железнодорожных вагонов и многие другие выходят из строя в результате усталости.

Циклом напряжений называется совокупность всех значений напряжений за период их изменения (см. рис.).

Периодом цикла T называется продолжительность одного цикла.



Цикл напряжений (см. рис.) характеризуется следующими параметрами:

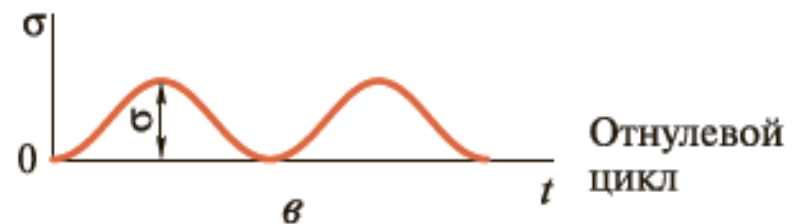
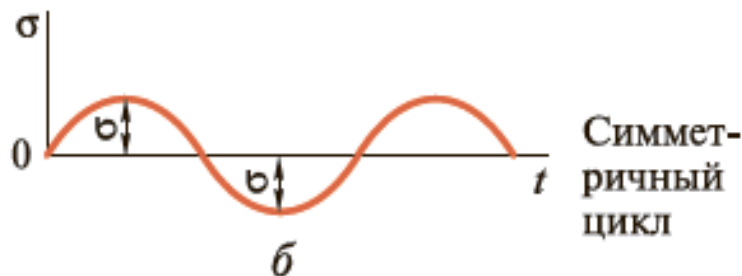
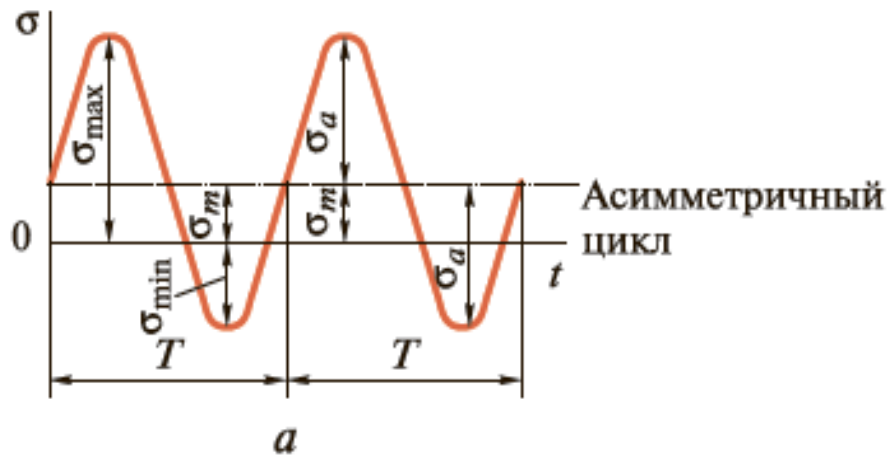
1) максимальное напряжение σ_{\max} ;

2) минимальное напряжение σ_{\min} ;

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

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

5) коэффициент асимметрии цикла $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.



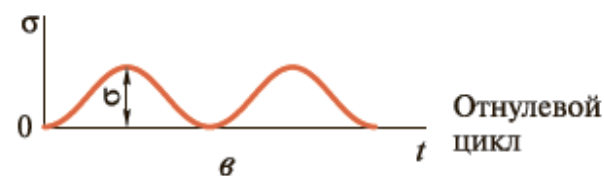
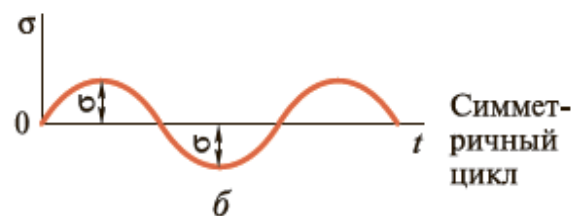
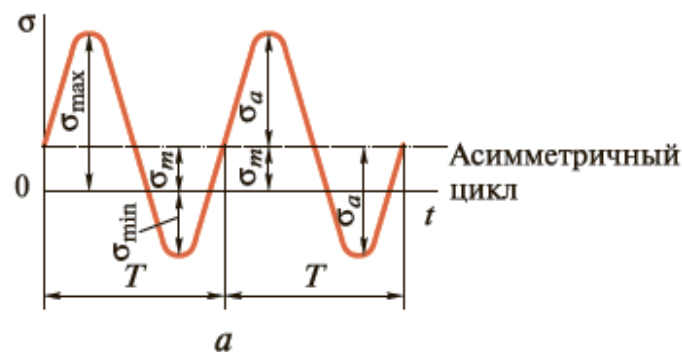
Циклы, имеющие одинаковый коэффициент асимметрии, называются подобными.

В случае равенства σ_{\max} и σ_{\min} по абсолютной величине имеем *симметричный* цикл напряжений (см. рис. б), при котором $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \pm\sigma$, $R_\sigma = -1$.

Цикл напряжений, изображенный на рис. а, является примером *асимметричного* знакопеременного цикла.

На рис. в показан *отнулевой* цикл напряжений, для которого $R_\sigma = 0$, так как $\sigma_{\min} = 0$.

В случае действия касательных напряжений необходимо в обозначениях и формулах заменить σ на τ .



Число циклов напряжений до начала усталостного разрушения называется циклической долговечностью и обозначается N .

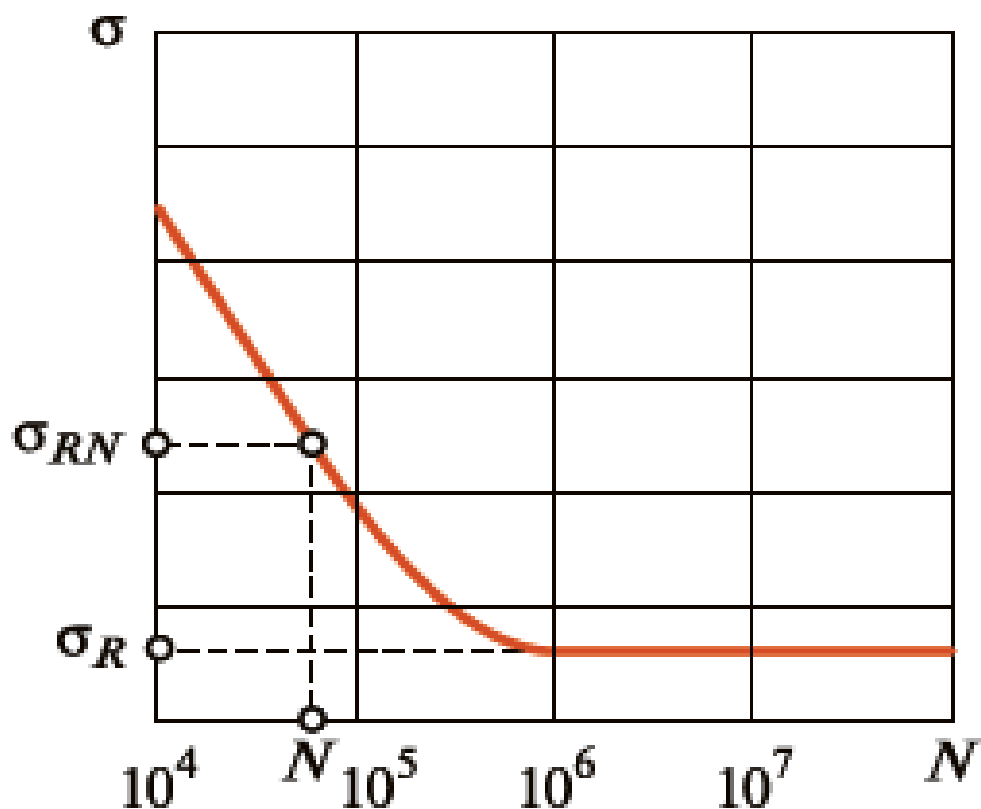
Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором материал может сопротивляться усталости при заданной циклической долговечности, называется *пределом выносливости*.

Предел выносливости для нормальных напряжений при симметричном цикле обозначают σ_{-1} , при отнулевом цикле — σ_0 , при цикле с коэффициентом асимметрии R_σ — σ_R .

Для определения предела выносливости производят испытания образцов на усталость на специальных машинах. Наибольшее распространение имеют испытания на усталость при изгибе и симметричном цикле напряжений. Предварительно устанавливаемая наибольшая продолжительность испытаний называется *базой испытаний*, обычно задаваемая числом циклов, обозначаемым N_0 . Для стали $N_0 = 10^7$ циклов.

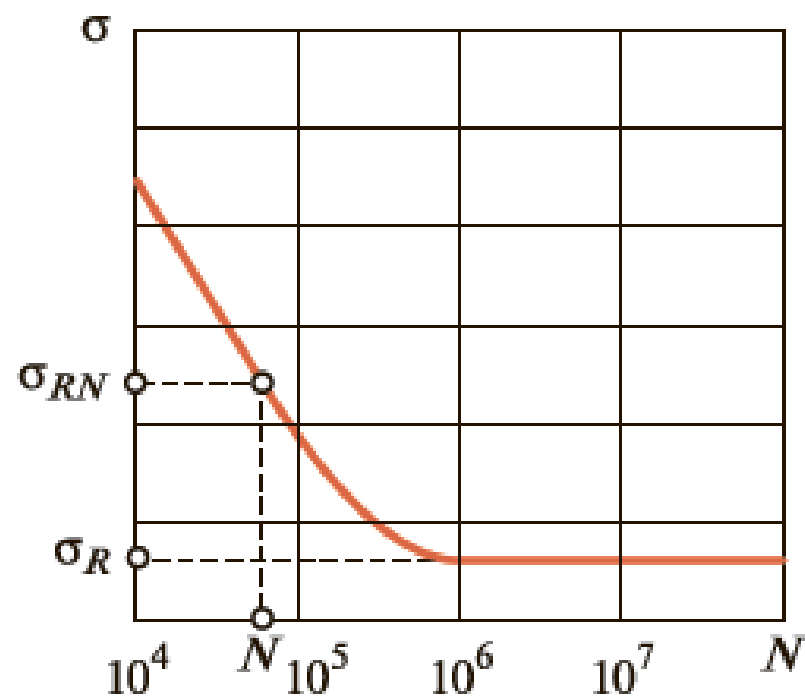
Для испытания на усталость изготавливают серию одинаковых тщательно отполированных образцов, имеющих в рабочей части цилиндрическую форму диаметром 5 ... 10 мм. Образцы доводят до разрушения при различной нагрузке и напряжениях, устанавливая при этом циклическую долговечность образца.

По полученным данным строят кривую усталости (см. рис.).



На кривой усталости имеется участок, стремящийся к горизонтальной асимптоте. Ордината этой асимптоты и дает значение предела выносливости σ_R .

Опыт показывает, что стальной образец, выдержавший 10^7 циклов, может выдержать и неограниченное число циклов. Экспериментально установлено, что при любом асимметричном цикле предел выносливости для того же материала будет выше, чем при симметричном цикле.



Симметричный цикл является наиболее опасным.

Для цветных металлов предел выносливости определяют при базе испытаний $N_0 = 10^8$ и более циклов.

Величина предела выносливости зависит от вида деформации. Испытания на усталость при растяжении — сжатии и кручении проводятся реже, поэтому пределы выносливости при растяжении σ_{-1p} и кручении τ_{-1} определяют из эмпирических формул по известному пределу выносливости σ_{-1} при симметричном цикле изгиба:

$$\sigma_{-1p} \approx (0,7 \dots 0,9)\sigma_{-1}; \tau_{-1} \approx 0,58\sigma_{-1}.$$

Пределы выносливости для симметричного цикла изгиба могут быть вычислены с помощью характеристик статической прочности (например, временного сопротивления σ_B) по следующим эмпирическим соотношениям:

для углеродистой стали

$$\sigma_{-1} \approx 0,43\sigma_B;$$

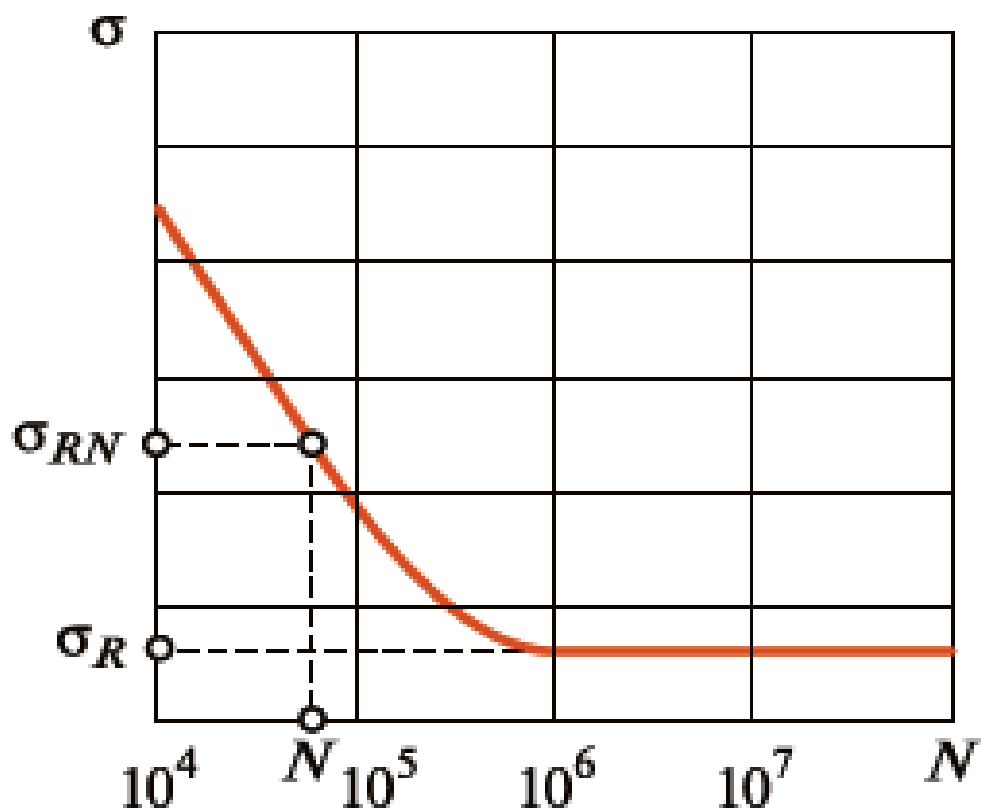
для легированной стали

$$\sigma_{-1} \approx 0,35\sigma_B + 120 \text{ МПа};$$

для серого чугуна

$$\sigma_{-1} \approx 0,45\sigma_B.$$

При расчетах деталей, не предназначенных для длительной эксплуатации, вместо предела выносливости учитывается *предел ограниченной выносливости* σ_{RN} – максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности N .



Влияние факторов на предел выносливости

Предел выносливости конкретной детали конструкции зависит от ряда факторов, главные из которых — концентрация напряжений, масштабный фактор (размеры детали) и состояние поверхности детали (шероховатость и поверхностное упрочнение).

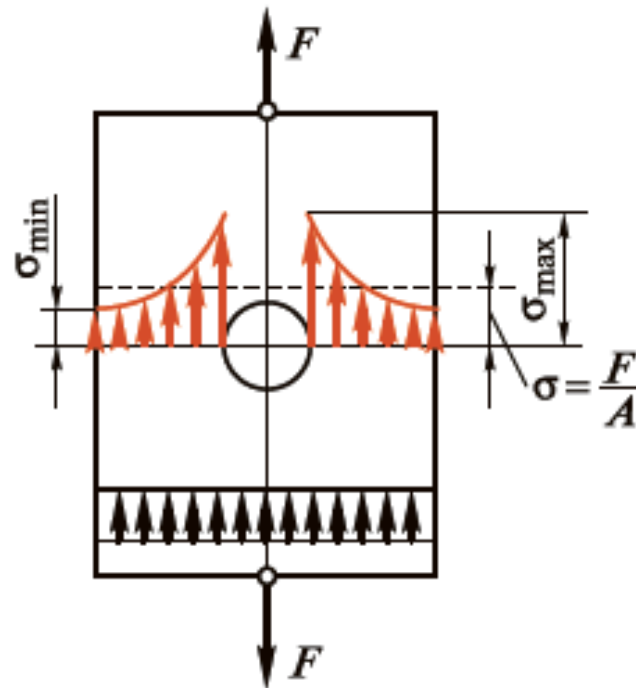
Влияние концентрации напряжений.

Концентрацией напряжений называется повышение напряжений в местах изменений формы или нарушений сплошности материала. Напряжения, вычисленные по формулам сопротивления материалов без учета концентрации, называются *номинальными напряжениями*.

Резкое изменение формы или площади поперечного сечения деталей (наличие отверстий, выточек, галтелей, канавок, надрезов и т. п.) приводит к неравномерному распределению напряжений, т. е. вызывают концентрацию напряжений.

Причина, вызывающая концентрацию напряжений (отверстие, выточка), называется концентратором напряжений.

Рассмотрим стальную полосу, растягиваемую силой F (см. рис.). В поперечном сечении площадью A полосы действует продольная сила $N = F$. Номинальное напряжение равно $\sigma = F/A$.



Концентрация напряжений имеет местный характер, поскольку с удалением от концентратора напряжения быстро падают, приближаясь к своим номинальным значениям. График распределения напряжений в месте концентратора показан на рисунке (иногда их называют местными напряжениями).

С количественной стороны концентрацию напряжений характеризует *теоретический коэффициент концентрации напряжений*. Коэффициент α_σ равен отношению наибольшего местного напряжения σ_{\max} к номинальному напряжению σ :

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}.$$

В случае концентрации касательных напряжений по аналогии принимают

$$\alpha_\tau = \frac{\tau_{\max}}{\tau}.$$

Концентрация напряжений по-разному влияет на прочность пластичных и хрупких материалов. Существенное значение при этом имеет и характер нагрузки. Если взять пластичный материал, нагруженный статически, то при увеличении нагрузки рост наибольших местных напряжений при достижении предела текучести приостанавливается вследствие местной текучести материала, и произойдет выравнивание напряжения по сечению.

Отсюда можно сделать вывод, что при статической нагрузке пластичные материалы малочувствительны к концентрации напряжений.

При нагрузках, быстро изменяющихся во времени, выравнивание напряжений произойти не успевает, поэтому концентрацию напряжений необходимо учитывать и для пластичных материалов.

При расчетах на прочность деталей из хрупких материалов концентрацию напряжений необходимо учитывать и при статической нагрузке, поскольку неравномерность распределения напряжений вследствие их концентрации сохраняется на всех стадиях нагружения.

Теоретический коэффициент концентрации отражает влияние концентратора напряжений в условиях, далеких от разрушения детали, поэтому вводится понятие эффективного коэффициента концентрации напряжений, обозначаемого K_σ или K_t .

Эффективным коэффициентом концентрации напряжений называется отношение предела выносливости σ_{-1} образца без концентрации напряжений к пределу выносливости $\sigma_{-1к}$ образцов с концентрацией напряжений, имеющих такие же абсолютные размеры, как и гладкие образцы:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1к}} \quad \text{и} \quad K_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1к}}.$$

Сравнение показывает, что эффективный коэффициент концентрации всегда меньше теоретического.

Для стальных валов при $\sigma_b \leq 800$ МПа принимают $K_{\sigma} \approx 1,4 \dots 2,5$.

Влияние абсолютных размеров детали. На основании опытов установлено, что предел выносливости зависит от абсолютных размеров поперечного сечения образца: с увеличением размеров сечения предел выносливости уменьшается.

Эта закономерность объясняется тем, что с увеличением объема материала возрастает вероятность наличия в нем неоднородностей строения и нарушений сплошности, что приводит к появлению очагов концентрации напряжений.

Влияние абсолютных размеров детали учитывается введением в расчетные формулы соответствующего коэффициента.

Коэффициентом влияния абсолютных размеров поперечного сечения K_d называется отношение предела выносливости гладких образцов диаметра d к пределу выносливости гладких образцов стандартных размеров:

$$K_d = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}}$$

Для стальных валов $K_d = 0,52 \dots 0,95$.

Влияние состояния поверхности детали.

На предел выносливости влияют шероховатость поверхности детали и поверхностное упрочнение.

С увеличением шероховатости поверхности предел выносливости понижается, что учитывается введением в расчетные формулы коэффициента влияния шероховатости поверхности K_F .

Коэффициентом влияния шероховатости поверхности называется отношение предела выносливости образцов с данной шероховатостью поверхности к пределу выносливости гладкого стандартного образца.

Значения этого коэффициента $K_F = 0,45 \dots 1,0$.

Для повышения сопротивления усталости широко применяются различные способы упрочнения поверхностей деталей, например поверхностная закалка, химико-термическая обработка, обкатка роликами, дробеструйная обработка и др. Отношение предела выносливости упрочненных образцов к пределу выносливости неупрочненных образцов называется *коэффициентом влияния поверхностного упрочнения* и обозначается K_v . Обычно $K_v = 1,1 \dots 2,8$.

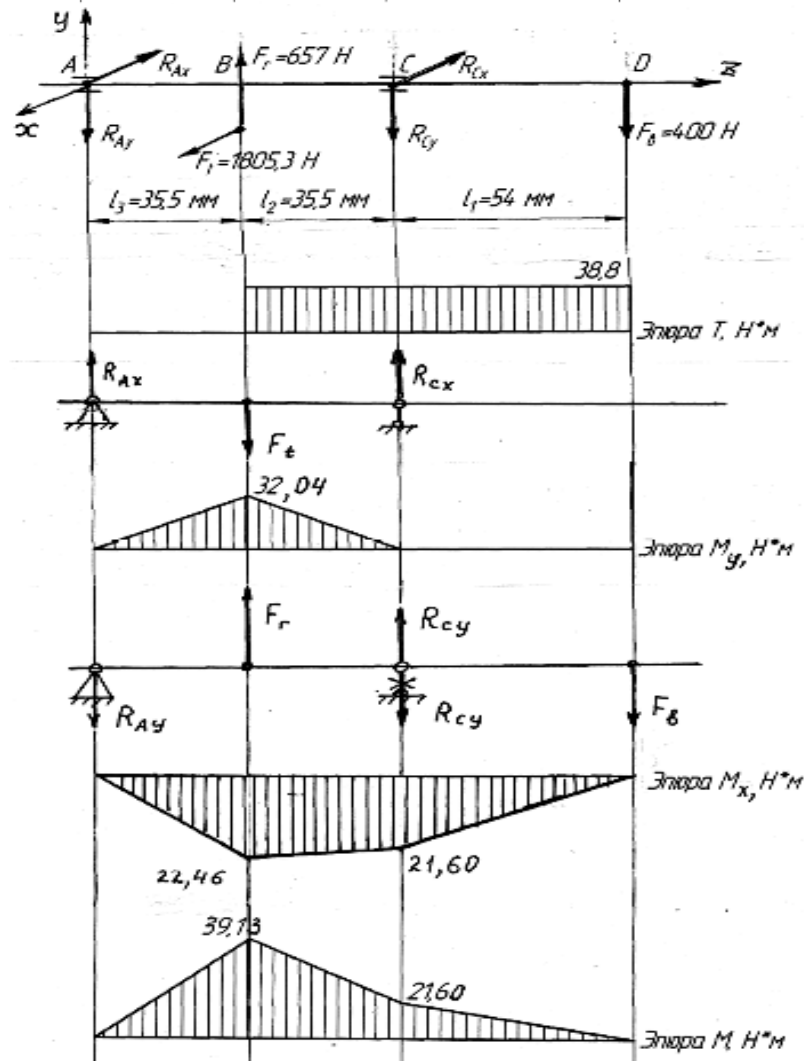
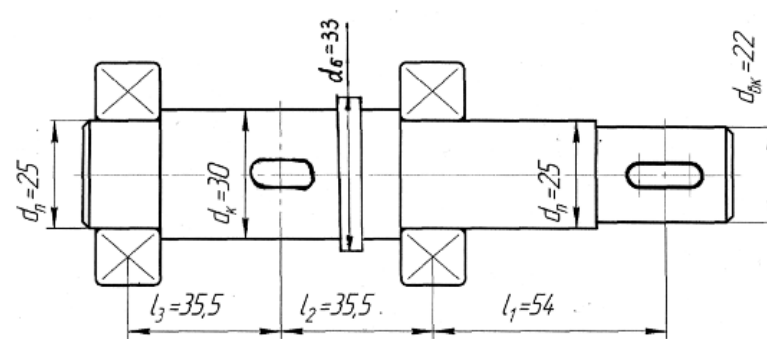
Общий коэффициент снижения предела выносливости обозначается K и определяется по формуле

$$K = \frac{K_{\sigma(\tau)} / K_{d\sigma} + 1 / K_F - 1}{K_v}.$$

Практическое задание

На рисунке представлен трансмиссионный вал и эпюра силовых факторов, из которой следует, что опасным является сечение B под шестерней. Диаметр вала в опасном сечении $d_{оп}=30\text{мм}$, сечение ослаблено шпоночной канавкой (концентратором напряжений) $b \times t_1=8 \times 4$. Внутренний изгибающий момент в опасном сечении $M_{оп}=M_{max}=39,13 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Вал испытывает деформацию кручения под воздействием крутящего момента $T=38,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Коэффициенты, учитывающие влияние шероховатости поверхности на предел выносливости $\beta_\sigma=\beta_\tau=1$. Требуемый коэффициент запаса устойчивости $[S]=1,5$. Нормальные напряжения, возникающие в поперечном сечении вала от изгибающего момента M , изменяются по симметричному циклу.

Выполнить проверочный расчет вала на усталость (выносливость). При расчете коэффициента запаса прочности по касательным напряжениям принять наиболее неблагоприятный отнулевой знакопостоянный цикл.



Решение

Расчет проводим в опасном сечении с наибольшим изгибающим моментом:

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \leq [S] = 1,5;$$

Коэффициент запаса прочности по нормальным напряжениям:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}.$$

Коэффициент запаса прочности по касательным напряжениям:

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_{\tau}}{\varepsilon_{\tau} \beta_{\tau}} \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m}.$$

Так как нормальные напряжения, возникающие в поперечном сечении вала от изгибающего момента M , изменяются по симметричному циклу, то средние напряжения циклов нормальных напряжений $\sigma_m=0$. Амплитуда циклов нормальных напряжений:

$$\sigma_a = \frac{M_{\max}}{W_x}.$$

Та как при расчете коэффициента запаса прочности по касательным напряжениям принимаем наиболее неблагоприятный отнулевой знакопостоянный цикл, амплитуда циклов и средние напряжения циклов касательных напряжений:

$$\tau_a = \tau_m = \frac{T}{2W_p}.$$

Для вала со шпоночной канавкой моменты сопротивления сечений при изгибе и кручении:

$$W_x = \frac{\pi \cdot d^3}{32} - \frac{e \cdot t_1 (d - t_1)^2}{2 \cdot d};$$

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} - \frac{e \cdot t_1 (d - t_1)^2}{2 \cdot d};$$

$$W_x = \frac{3,14 \cdot 30^3}{32} - \frac{8 \cdot 4 \cdot (30 - 4)^2}{2 \cdot 30} = 22,89 \cdot 10^2 \text{ мм}^3$$

$$W_p = \frac{3,14 \cdot 30^3}{16} - \frac{8 \cdot 4 \cdot (30 - 4)^2}{2 \cdot 30} = 49,38 \cdot 10^2 \text{ мм}^3$$

$$\sigma_a = \frac{39,13 \cdot 10^3}{22,89 \cdot 10^2} = 17,09 \text{ МПа};$$

$$\tau_m = \tau_a = \frac{38,8 \cdot 10^3}{2 \cdot 49,38 \cdot 10^2} = 3,93 \text{ МПа};$$

$$S_\sigma = \frac{383}{\frac{1,7}{0,91 \cdot 1} \cdot 17,09} = 11,05;$$

$$S_\tau = \frac{226}{\frac{1,55}{0,89 \cdot 1} \cdot 3,93 + 0,05 \cdot 3,93} = 32,1;$$

$$S = \frac{11,05 \cdot 32,1}{\sqrt{11,05^2 + 32,1^2}} = 10,45 \geq 1,5.$$

При невыполнении неравенства необходимо выбрать другой материал вала с более высокими прочностными характеристиками и повторить расчёт.