

## **Раздел 8 Механические свойства, определяемые при циклических испытаниях**

### **Тема 1 Циклические испытания (2 часа)**

План лекции

1. Усталость и выносливость.
2. Усталостная трещина.
3. Задача усталостных испытаний.
4. Современные методы испытаний на усталость
5. Цикл напряжений.
6. Стандартные образцы.
7. Предел выносливости.

В условиях действия циклических напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин, вызывающее в конечном итоге полное разрушение детали образца. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к уменьшению долговечности из-за образования трещин и разрушения, называют *усталостью*, а свойство противостоять усталости – *выносливостью*.

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Процесс распространения усталостной трещины длителен. Он продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. Тогда произойдет быстрое разрушение, как правило, хрупкое из-за наличия острого надреза.

Задача усталостных испытаний – дать количественную оценку способности материалам работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

Современные методы испытаний на усталость (выносливость) разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение – сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах.

В процессе любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто по знаку. Пример показан на рисунке 15.

*Цикл напряжений* – это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. За максимальное напряжение цикла  $\sigma_{max}$  принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение. Минимальное напряжение цикла  $\sigma_{min}$  – наименьшее по алгебраической величине напряжение.

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

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

Сложение и вычитание максимальных и минимальных напряжений в этих формулах производят с учетом знака:

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

Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии:

$$R_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_{min}.$$

Если  $R_\sigma = -1$ , то такой цикл называют симметричным (рисунок 15, кривая 1). Если же минимальное и максимальное напряжение цикла по величине не равны по величине, то он называется асимметричным. Когда напряжения меняются по величине и знаку, цикл считается знакопеременным (рисунок 15, кривые 1, 2), если только по величине – знакопостоянным (кривая 3). Для испытаний чаще всего используют симметричные знакопеременные циклы с  $R_\sigma = -1$ .

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях – изгиб. Особенno проста схема чистого изгиба образца при вращении. Нагрузка здесь прилагается в двух точках, что обеспечивает постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца.

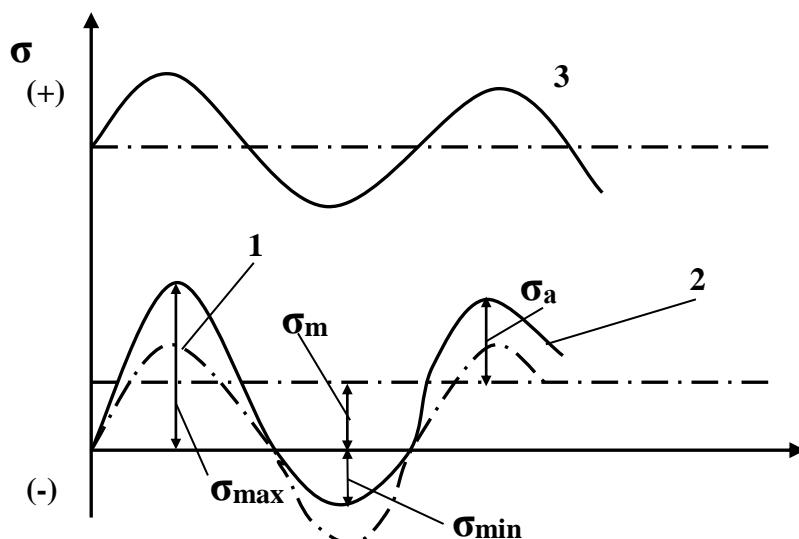


Рисунок 15 – Разновидности циклов напряжений

Помимо схемы чистого изгиба, часто применяют круговой изгиб консольно закрепленного образца. Его головка крепится в патроне, а к другому концу прилагается изгибающий момент. Максимальное значение изгибающий момент достигает только в одном сечении – вблизи основания консоли, что является недостатком данной схемы нагружения.

Для испытаний в условиях циклического растяжения – сжатия используют гидропульсационные и резонансные машины. Первые представляют собой универсальные машины с гидравлическим приводом для статических испытаний, снабженные гидропульсатором. Это однопоршневый маячильный насос, который присоединяется к рабочему цилиндру машины. Ход поршня насоса устанавливают в соответствии с заданной амплитудой

напряжений цикла.

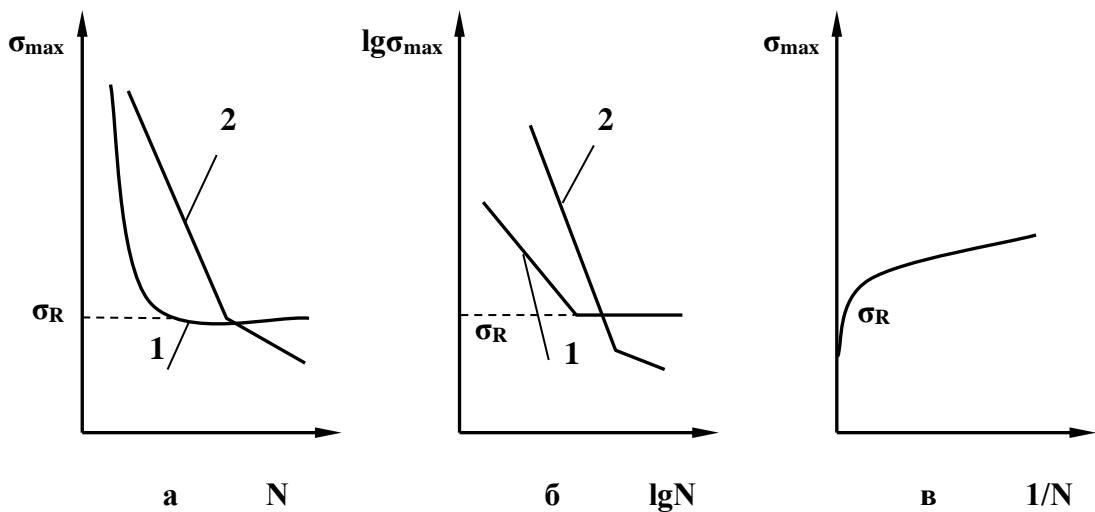
Резонансные машины для усталостных испытаний осуществляют циклическое растяжение – сжатие с помощью независимой от образца вибрирующей системы. Она состоит из плоской или цилиндрической рессоры и массы силовозбуждения.

Рабочая часть стандартных образцов имеет круглое или прямоугольное сечение. Диаметр цилиндрической части гладких образцов  $d$  обычно составляет 5...10 мм, а у образцов с надрезом  $D=10\ldots 20$  мм при глубине надреза  $t=0,25D$ . Ширина рабочей части плоских образцов  $b=10\ldots 20$  мм и толщина  $a=5\ldots 10$  мм.

Усталостные свойства зависят от размеров образца – они значительно выше у образцов с меньшим сечением.

Первичным результатом усталостного испытания одного образца является число циклов до разрушения (долговечность) при заданных характеристиках цикла. Конечная цель испытания с постоянным коэффициентом – определения *предела выносливости*  $\sigma_R$  – наибольшего значения максимального предела цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения.

По результатам испытания отдельных образцов строят кривую усталости в координатах *максимальное напряжение цикла*  $\sigma_{max}$  (или  $\sigma_a$ ) – *долговечность*  $N$  (рисунок 16, а). Из-за относительно большого разброса экспериментальных точек построение этих кривых рекомендуется проводить методом наименьших квадратов. Наиболее наглядны кривые усталости в логарифмических или полулогарифмических координатах (рисунок 16, б, в).



**а – кривая в координатах  $\sigma_{max}$ - $N$ ; б – кривая в логарифмических координатах;**  
**в – кривая в полулогарифмических координатах**

Рисунок 16 – Кривые усталости в различных координатах

По мере уменьшения максимального напряжения цикла долговечность всех материалов возрастает. При этом у сталей кривая усталости

асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс (рисунок 16, кривая 1). Ордината, соответствующая постоянному значению  $\sigma_{max}$ , и есть предел выносливости таких материалов – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения при любом числе циклов  $N$ . Многие цветные металлы и сплавы не имеют горизонтального участка на кривых усталости (рисунок 16, а, б, кривые 2). В этом случае выделяют ограниченный предел выносливости – наибольшее напряжение  $\sigma_{max}$  ( $\sigma_a$ ), которое материал выдерживает, не разрушаясь в течение определенного числа циклов нагружения. Это число циклов называют *базой испытания*. Она обычно составляет  $10^8$  циклов (когда на кривой усталости имеется горизонтальный участок, испытания продолжают не более чем до  $10^7$  циклов).

Кривые усталости, построенные при использовании цикла  $R_\sigma=1$ , для многих металлических материалов хорошо описываются уравнением Вейбулла:

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + a(N+B)^{-\alpha},$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости;

$N$  – долговечность;

$a, B, \alpha$  – коэффициенты.

Величина  $B$  во многих случаях лежит в пределах от 0 до  $10^4$  циклов, и поэтому в стандартных испытаниях с большой базой ею можно пренебречь.

Статистическая обработка проводится для вероятностной оценки усталостной долговечности – числа циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении.

Для этого при четырех-пяти различных уровнях напряжений, превышающих  $\sigma_R$  материала, проводят испытание серии образцов. Их число на каждом уровне  $\sigma_{max}$  определяется свойствами и необходимой достоверностью результатов. Каждый образец испытывают до разрушения или до базового числа циклов. Затем результаты испытания образцов при каждом уровне напряжений подвергают статистической обработке, последовательно определяя  $i, P_i, N_i$  и  $\lg N_i$ . Здесь  $i$  – порядковый номер данного образца в возрастающем ряду долговечности образцов этой серии (от 1 до  $n$  – общего числа образцов в серии).  $P$  – накопленная частота, соответствующая вероятности разрушения:

$P=(i-0,5)/n$ ;  $N_i$  – долговечность  $i$ -го образца.

По полученным данным строят графики функций распределения вероятности разрушения образцов. По оси абсцисс откладывают десятичные логарифмы числа циклов, а по оси ординат – накопленные частоты в предположении, что ряд значений логарифмов долговечности подчиняется закону нормального распределения.

Величина предела выносливости снижается при наличии концентраторов напряжений. Для количественной оценки чувствительности  $\sigma_R$  к концентраторам определяют *эффективный коэффициент напряжений*  $K_\sigma$ . При симметричном знакопеременном цикле:

$$K_{\sigma} = \sigma_{-I} / \sigma_{-I_H},$$

где  $\sigma_{-I}$ ,  $\sigma_{-I_H}$  – пределы выносливости гладкого образца и образца с надрезом.

Усталостные свойства, как и всякие механические свойства, зависят от условий проведения испытаний, свойства и структуры металла.

*Влияние характеристик цикла напряжения.* Чем больше максимально напряжение цикла и его амплитуда, тем быстрее происходит усталостное разрушение.

Существенное влияние на характеристики выносливости оказывает соотношение растягивающих и сжимающих напряжений. Чем больше растягивающие напряжения, тем ниже выносливость. Увеличение средних сжимающих напряжений при неизменном растягивающем смещает кривую усталости в сторону больших напряжений. Эти эффекты объясняются противоположным действием растягивающих и сжимающих напряжений на процесс раскрытия трещины. Дополнительное сжатие тормозит этот процесс, а растяжение ускоряет его.

Характер изменения напряжения между  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  мало сказывается на выносливости. Повышение частоты циклов при прочих равных условиях обычно вызывает некоторое увеличение характеристик выносливости, особенно при повышенных температурах. Наибольший предел выносливости получается при испытаниях по схеме изгиба, наименьший – при кручении.

#### Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Шарай О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

#### Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9]

1. Методика проведения усталостных испытаний.
2. Схемы резонансных машин для проведения усталостных испытаний.
3. Пластическая деформация при циклическом нагружении.
4. Зарождение усталостных трещин.
5. Распространение усталостных трещин.
6. Влияние различных факторов на характеристики выносливости.