

## **Раздел 2 Классификация механических испытаний**

### **Тема 1 Классификация механических испытаний (2 часа)**

#### **План лекции**

1. Способы нагружения образцов.
2. Статические нагрузки.
3. Динамические нагрузки.
4. Циклические нагрузки.
5. Испытания на твердость.
6. Испытания на ползучесть и длительную прочность.
7. Условия подобия механических испытаний.

#### **Классификация и виды механических испытаний**

Используют два способа нагружения образца: 1) путем его деформации с заданной скоростью и измерением сил сопротивления образца этой деформации и 2) подачей постоянной нагрузки на образец с измерением возникающей при этом деформации.

Наиболее распространен первый способ, обеспечивающий возможность непрерывного измерения и записи силы сопротивления образца деформированию. Он используется практически во всех разновидностях статических испытаний.

Важнейшие примеры применения второго способа нагружения – испытания на ползучесть и длительную прочность.

По характеру изменения во времени нагрузки подразделяют на статические, динамические и циклические. *Статические* нагрузки характеризуются относительно медленным возрастанием от нуля до некоторой максимальной величины (обычно секунды – минуты). При *динамическом* нагружении это возрастание происходит за очень короткий промежуток времени (доли секунды). *Циклические* нагрузки характеризуются многократными изменениями по направлению и (или) по величине.

В соответствии с характером действующих нагрузок различают статические, динамические и циклические испытания.

Статические испытания отличаются плавным, относительно медленным изменением нагрузки образца и малой скоростью его деформации, а также такой малой величиной ускорения движущихся частей машины, что возникающими в них силами инерции можно пренебречь. При статических испытаниях можно методом простого статического равновесия с достаточной точностью определять усилия и деформации, а также величины работы деформации в любой момент испытания.

Наиболее важны следующие виды статических испытаний, отличающиеся схемой приложения нагрузок к образцу: одноосное растяжение, одноосное сжатие, изгиб, кручение.

Динамические испытания характеризуются приложением к образцу нагрузок с резким изменением их величины и большой скоростью их деформации. Динамическую нагрузку создают ударом по образцу свободно падающей тяжелой массы. В результате в отдельных частях образца и

испытательной машины возникают значительные силы инерции. В результате динамических испытаний определяют величину полной или удельной работы динамических деформаций, а также величину остаточной деформации образца. Динамические испытания чаще всего проводят по схеме изгиба.

Для испытаний на усталость характерно многократное приложение к образцу изменяющихся нагрузок. Такие испытания обычно длительны (часы – сотни часов). По результатам усталостных испытаний определяют число циклов до разрушения при разных значениях напряжений, а в конечном итоге – то предельное напряжение, которое образец выдерживает без разрушения в течение определенного числа циклов нагружения. При усталостных испытаниях используют различные схемы приложения нагрузок: изгиб, растяжение, сжатие, кручение.

Существуют еще две большие *специфические* группы испытаний. Первая из них – это испытания на твердость, в которых оценивают различные характеристики сопротивления деформации или разрушению поверхностных слоев образца при взаимодействии с другим телом – *индентором*. Большинство разновидностей испытаний на твердость – статическое.

Вторая группа – испытания на ползучесть и длительную прочность. Их обычно проводят при повышенных температурах для оценки характеристик жаропрочности. Образцы в течение всего испытания находятся под постоянным напряжением. При испытании на ползучесть измеряют величину деформации в функции времени при разных напряжениях на образце, а в результате испытаний на длительную прочность оценивают время до разрушения под действием различных напряжений.

Испытания проводятся при различных температурах, начиная от очень низких отрицательных и кончая температурами в интервале плавления, в разных средах и т. д.

Необходимо выполнение определенных условий проведения испытаний, которые бы обеспечили постоянство результатов при многократном повторении испытаний. Соблюдение этих правил должно гарантировать сопоставимость результатов испытаний, проведенных в разное время, в разных лабораториях, на разном оборудовании и т. д. Условия, обеспечивающие такое постоянство и сопоставимость результатов, называются *условиями подобия механических испытаний*.

Для этого необходимо соблюдение трех видов подобия:

- 1) геометрического (форма и размеры образца);
- 2) механического (схема и скорость приложения нагрузок);
- 3) физического (внешние физические условия).

Форма и размеры образца влияют на результаты испытания через схему напряженного состояния, которая зависит от формы тела и определенного расположения точек приложения нагрузок.

В общем виде механическое подобие заключается в том, чтобы в сходных сечениях рабочей части образцов возникали тождественное напряженное состояние и одинаковая относительная деформация. Если можно пренебречь влиянием скорости деформации, то условие механического

подобия сведется к тому, чтобы все прилагаемые к образцу внешние силы были подобно направлены и приложены в соответствующих точках. При больших скоростях деформации соблюдение механического подобия в разных по размеру образцах усложняется.

Для получения сопоставимых результатов и правильного их анализа большое значение имеет методика изготовления образцов для испытаний. В каждом случае она должна быть оговорена. Один и тот же материал в зависимости от условий его получения (скорости кристаллизации при литье, степени обжатия при прокатке и т. д.) может обладать различными свойствами. Поэтому для получения сравнимых данных всегда необходимо соблюдать идентичность режимов (а не только методов) получения и обработки заготовок для образцов, изготавливать их (например, на станках) по одной технологии.

Способ изготовления образца должен быть такой, чтобы в последнем создавалась структура, идентичная структуре соответствующей детали. При изготовлении образцов заданной формы нужно использовать такие методы обработки, которые не меняют свойств металла, присущих ему в заготовке или изделии. Поэтому образцы в процессе изготовления нельзя нагревать значительно выше комнатной температуры, подвергать пластическим деформациям (наклеп) и т. д. Большое значение имеет качество поверхности образцов. Поверхностные дефекты (царапины, риски) служат концентраторами напряжений и снижают характеристики прочности и пластичности.

#### 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. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. 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], [4], [9]

1. Способы нагружения образцов.
2. Специфические группы испытаний.
3. Критерии подобия механических испытаний. Цель. Примеры.

### **Раздел 3 Упругие свойства и неполная упругость металлов**

#### **Тема 1 Упругие свойства (2 часа)**

##### **План лекции**

1. Закон Гука.
2. Константы упругих свойств.
3. Модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона

4. Методы определения упругих свойств:

5. Резонансный метод.
6. Импульсный метод.
7. Крутильный маятник

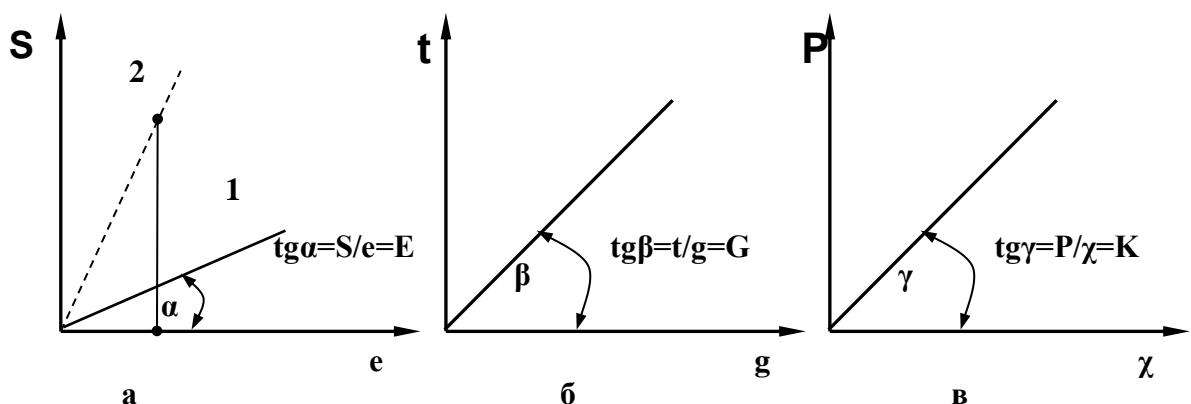
### Закон Гука и константы упругих свойств.

Стадию упругой деформации образцы проходят при всех без исключения видах механических испытаниях.

Поведение металлов при упругой деформации описывается законом Гука, который определяет прямую пропорциональность между напряжением и упругой деформацией. На рисунке 4 показаны начальные (упругие) участки кривых *напряжение – деформация* при одноосном растяжении, кручении и гидростатическом сжатии.

Наклон каждой из этих трех кривых, т. е. коэффициент пропорциональности, связывающий напряжения и деформацию, характеризует модуль упругости:

$$E=S/e; G=t/g; K=P/\chi.$$



**а – одноосное растяжение; б – кручение; в – гидростатическое сжатие**

Рисунок 4 – Упругие участки кривых напряжение – деформация

Модуль  $E$ , определяемый при растяжении, называется модулем нормальной упругости, или модулем Юнга. Модуль  $G$  – модуль сдвига (касательной упругости).  $K$  – модуль объемной упругости ( $P$  – гидростатическое давление,  $\chi$  – уменьшение объема). Модули упругости определяют жесткость материала, т. е. интенсивность увеличения напряжения по мере упругой деформации.

Механизм упругой деформации металлов состоит в обратимых смещениях атомов из положения равновесия в кристаллической решетке. Чем больше величина смещения каждого атома, тем больше упругая макродеформация всего образца. Величина этой упругой деформации металлов не может быть большой (относительное удлинение в упругой области обычно меньше одного процента), т. к. атомы кристаллической решетки способны упруго смещаться лишь на небольшую долю межатомного

расстояния. Физический смысл модулей упругости как раз и состоит в том, что они характеризуют сопротивляемость металлов упругой деформации, т. е. смещению атомов из положений равновесия в решетке. Если сравнивать два металла, например, с разными  $e$  (рисунок 4, а, прямые 1, 2), то для одинакового смещения атомов (равной упругой деформации) при большем  $e$  потребуется большее напряжение (прямая 2). При сложных схемах напряженного состояния деформация может не совпадать по направлению с напряжением. Для изотропного тела закон Гука, устанавливающий линейную связь между напряжениями и деформациями в любых направлениях:

$$\begin{aligned} e_x &= 1/E \cdot [S_x - \nu \cdot (S_y + S_z)], \\ e_y &= 1/E \cdot [S_y - \nu \cdot (S_x + S_z)], \\ e_z &= 1/E \cdot [S_z - \nu \cdot (S_x + S_y)], \\ g_{xy} &= t_{xy}/G, \\ g_{xz} &= t_{xz}/G, \\ g_{yz} &= t_{yz}/G, \end{aligned}$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона при одноосном растяжении (сжатии), характеризующий отношение поперечной относительной деформации к продольной.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  – четвертая важнейшая константа упругих свойств после модулей упругости. Эти четыре константы связаны между собой:

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu);$$

$$E = 3 \cdot K \cdot (1 - 2 \cdot \nu).$$

Зная две из них, можно рассчитать остальные.

Обобщенный закон Гука записывается относительно просто для изотропного тела. Металлы имеют кристаллическую структуру и являются телами анизотропными. Чем меньше расстояние между соседними атомами, тем больше в данном направлении должен быть модуль упругости. Для анизотропного тела закон Гука существенно усложняется: он отражает прямую пропорциональность между каждым компонентом тензора деформации и всеми шестью независимыми компонентами тензора напряжений.

Модули упругости являются важнейшими характеристиками прочности межатомной связи. Их величина зависит от всех факторов, определяющих силы межатомного взаимодействия. С повышением температуры модули упругости снижаются. При легировании металлов элементами, образующими твердые растворы, модули упругости меняются линейно, причем могут увеличиваться и уменьшаться.

### **Методы определения упругих свойств: резонансный, импульсный**

Некоторые константы упругих свойств можно определить с помощью

стандартных статических испытаний. В частности, по результатам испытаний на растяжение оценивают  $E$ , на кручение  $G$ . Чаще модули упругости измеряют с использованием специальных динамических методов, отличающихся более высокой точностью, а коэффициент Пуассона находят по результатам рентгеноструктурного анализа, определяя период решетки упругонапряженного образца вдоль и поперек направления деформации.

Особенно хорошо разработаны динамические методы определения модуля сдвига  $G$  и модуля нормальной упругости  $E$ . Все динамические методы базируются на том, что частота колебаний исследуемого образца (*резонансные методы*) или скорость звука в нем (*импульсные методы*) зависят от констант упругости.

При использовании резонансных методов образец в виде стержня возбуждается до одной из собственных частот продольными или поперечными волнами. Длина этих волн должна быть значительно больше радиуса образца.

Тогда в момент совпадения частоты вынуждающих колебаний с собственной частотой колебаний образца в нем возникает *стоячая волна*. Модуль  $E$  связан с резонансной частотой  $\omega_{rez}$  соотношением (для достаточно длинного стержня)

$$E = 4 \cdot \rho \cdot l \cdot \omega_{rez} \cdot \Delta,$$

где  $\rho$  – плотность материала образца;

$l$  – длина образца;

$\Delta$  – коэффициент, определяемый как  $\Delta = 1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 v^2 r^2}{l^2}$ ;

$r$  – радиус образца;

$v$  – коэффициент Пуассона.

Возбуждение механических колебаний частотой  $10^2 \dots 10^5$  Гц в образцах может производиться различными способами. Частоту колебаний, в том числе и резонансную, можно определить с помощью осциллографа.

Для определения модуля сдвига  $G$  используется крутильный маятник. Частота его колебаний связана с модулем  $G$ :

$$\omega = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot r^4 \cdot G}{2 \cdot l \cdot I}},$$

где  $r$  – радиус образца;

$l$  – его длина;

$I$  – момент инерции груза.

Экспериментальное определение модуля сдвига проводят на тех же установках, что и определение внутреннего трения.

В импульсных методах определения констант упругости используют частоты порядка мегаГерц. Применение этих методов основано на зависимости скорости звука ( $v$ ) от констант упругости среды, в которой он распространяется:

$$v_{prod} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}},$$

$$v_{nonep} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Таким образом, определяя скорости распространения продольных и поперечных звуковых волн в образце, диаметр которого намного больше длины волны, можно найти модули упругости материала образца. Для подачи ультразвуковых импульсов используют ультразвуковые генераторы, а для изменения  $v_{prod}$  и  $v_{nonep}$  – пьезокристалл кварца, связанный через усилители с электронным осциллографом.

#### 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. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Шарай О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.