

Раздел 6 Механические свойства, определяемые при статических испытаниях

Тема 1 Испытания на растяжение и характерные точки диаграммы растяжения (2 часа)

План лекции

1. Испытания на одноосное растяжение.
2. Прочностные свойства.
3. Стандартные образцы для испытаний на растяжение.
4. Разновидности первичных диаграмм растяжения.
5. Предел пропорциональности.
6. Предел текучести.
7. Предел прочности.

Испытания на растяжение и характерные точки диаграммы растяжения

В большинстве случаев металлические материалы в конструкциях работают под статическими нагрузками. Поэтому статические испытания широко распространены и проводятся с использованием разных схем напряженного состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытания на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки механических металлов. Методы испытания на растяжение стандартизированы. Помимо основной рабочей части большинство образцов (рисунок 17) имеет головки различной конфигурации для крепления в захватах.

Механические свойства при растяжении могут быть разделены на две группы – прочностные и пластические. *Прочностные свойства* – это характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определенных точек на диаграмме растяжения, в виде условных растягивающих напряжений. На практике механические свойства определяют по первичным кривым растяжения в координатах *нагрузка – абсолютное удлинение*, которые автоматически записываются на диаграммной ленте испытательной машины. Для поликристаллов различных металлов все многообразие этих кривых можно свести к трем типам (рисунок 18).

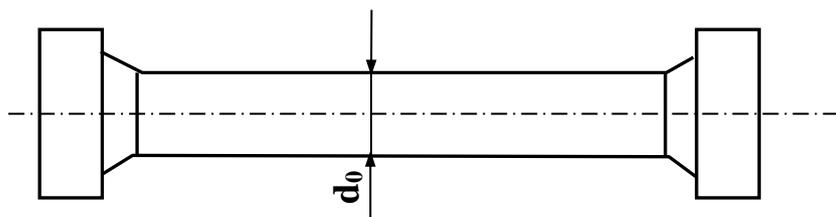
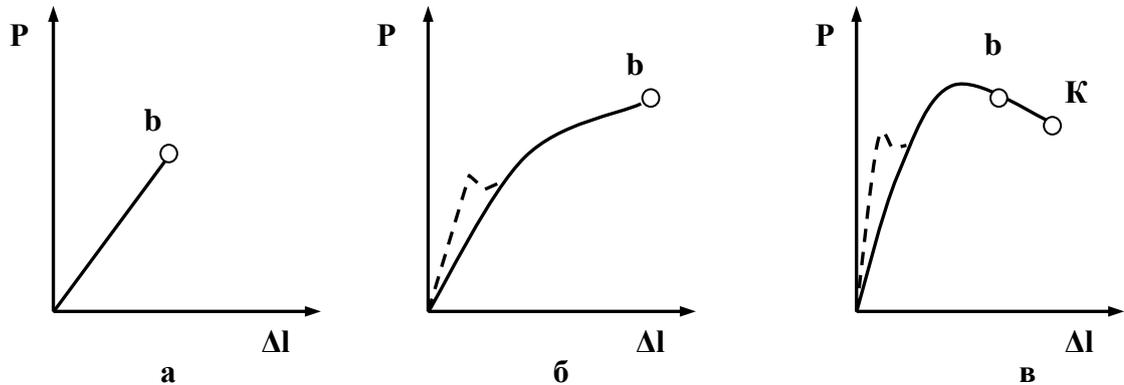


Рисунок 17 – Стандартный образец для испытаний на растяжение

В зависимости от типа диаграммы меняется набор характеристик, которые по ней можно рассчитать, а также их физический смысл. На рисунке 19 (диаграмма третьего типа) нанесены характерные точки, по ординатам которых рассчитывают прочностные характеристики ($\sigma_i = P_i/F_0$). Как видно, на диаграммах других двух типов могут быть нанесены не все эти точки.



а) хрупкое разрушение; б) разрушение после равномерной деформации;
в) разрушение после образования шейки

Рисунок 18 – Разновидности первичных диаграмм растяжения

Усилие P_{nc} определяет величину *предела пропорциональности* σ_{nc} – напряжения, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука ($\sigma_{nc} = P_{nc}/F_0$).

Усилие P_{unp} определяет величину *условного предела упругости* σ_{unp} – напряжения, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,05%. Иногда меньше – до 0,005%. Это напряжение, при котором появляются первые признаки микропластической деформации ($\sigma_{unp} = P_{unp}/F_0$).

Усилие P_T определяет величину *физического предела текучести* σ_T – напряжения, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины, обычно 0,2%. Иногда 0,1%; 0,3% и больше. Это напряжение, при котором образец деформируется под действием практически неизменной растягивающей нагрузки ($\sigma_T = P_T/F_0$). Физический предел часто называют нижним в отличие от верхнего предела текучести, рассчитываемого по нагрузке, соответствующего вершине зуба текучести *u* на рисунке 19.

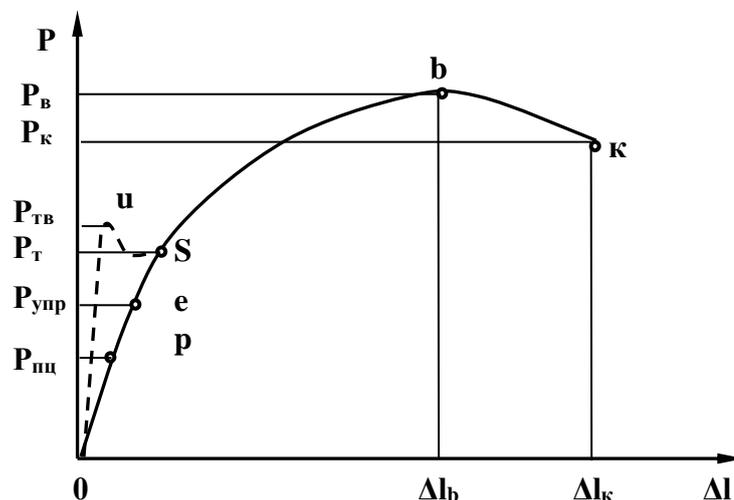


Рисунок 19 – Характерные точки на диаграмме растяжения, по которым рассчитывают прочностные характеристики

Усилие P_6 определяет величину *предела прочности* σ_6 – условного напряжения, характеризующего сопротивление максимальной равномерной деформации ($\sigma_6 = P_6 / F_0$).

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. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 2 Испытания на сжатие (2 часа)

План лекции

1. Относительное укорочение и относительное уширение.
2. Схема испытания на сжатие.
3. Геометрия образцов при испытаниях на сжатие.
4. Способы уменьшения силы трения на опорных поверхностях образца.
5. Схемы разрушения при испытаниях на сжатие.
6. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия.
7. Истинное напряжение сжатия.

Испытания на сжатие. Схемы разрушения при сжатии

Схема одноосного сжатия характеризуется большим коэффициентом мягкости ($\alpha=2$). Поэтому испытаниям на сжатие целесообразно подвергать относительно хрупкие материалы. В целом испытания на сжатие распространены гораздо меньше, чем на растяжение.

Одноосное сжатие можно рассматривать как растяжение с обратным знаком. В результате пластической деформации образец укорачивается и уширяется. Следовательно, можно определять относительное укорочение:

$$\varepsilon = 100\% \cdot (h_0 - h_k) / h_0$$

и относительное уширение:

$$\varphi = 100\% \cdot (F_k - F_0) / F_0,$$

где h_0 и h_k – начальная и конечная высота образца;

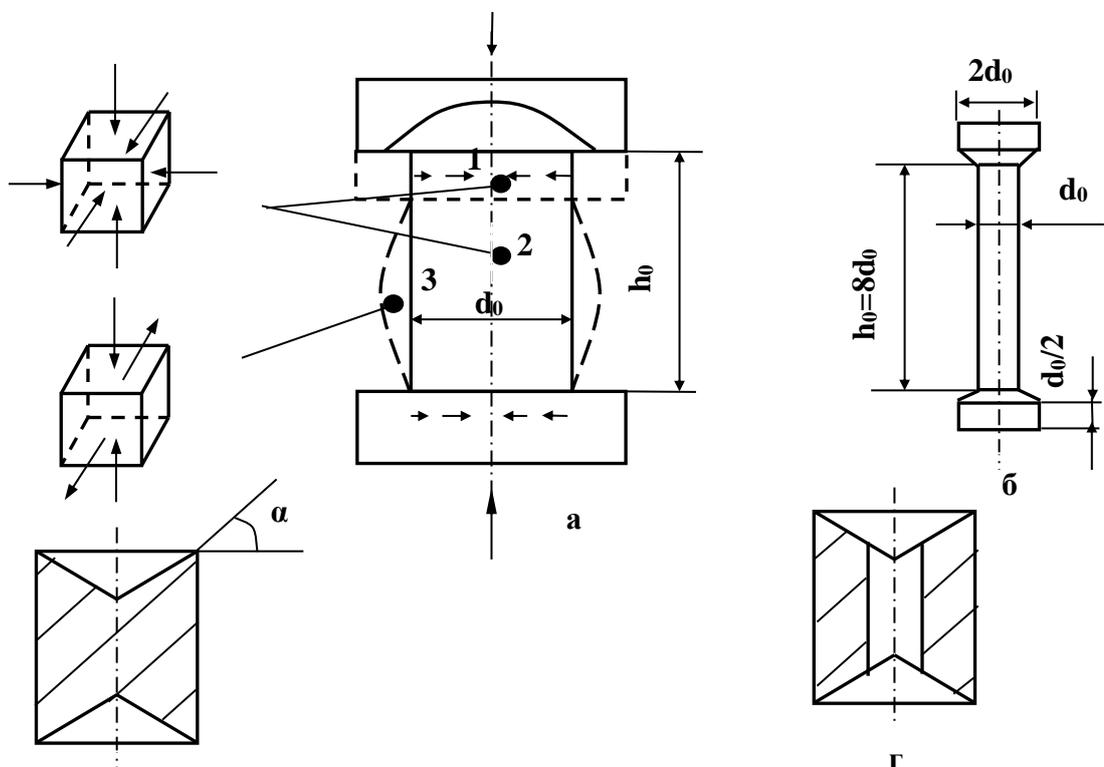
F_0 и F_k – начальная и конечная площади поперечного сечения.

Схема испытания на сжатие и геометрия используемых образцов показаны на рисунке 20. Испытания на сжатие проводят на тех же машинах, на которых ведутся испытания на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и сжимают подвижным захватом. Для устранения перекоса образца усилие сжатия следует передавать на него с помощью какого-либо направляющего приспособления, например, шарового вкладыша в верхнем захвате.

По мере сжатия на торцевых поверхностях образца возникают силы трения, направленные по радиусам к его центру и препятствующие деформации в горизонтальном направлении. В результате образец приобретает характерную бочкообразную форму, а схема напряженного состояния усложняется и становится различной в разных точках образца. В точках 1 и 2 возникает схема объемного сжатия, а в точке 3 – равноосное плоское напряженное состояние. Неоднородность напряженного состояния учесть крайне трудно и на практике ее игнорируют. Поэтому стараются уменьшить силы трения на опорных поверхностях образца. Для этого вводят смазки (вазелин, солидол); прокладки – (тефлон) – между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами. Используют образцы с коническими поверхностями на торцах. При этом угол конусности α подбирают так, чтобы $\operatorname{tg} \alpha$ был равен коэффициенту трения. Помимо конусности, в образце делают отверстие, устраняющее концентрацию напряжений у острия конуса.

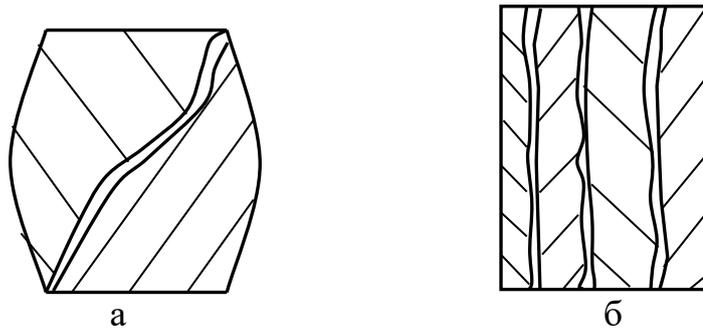
Но полностью устранить контактные силы трения не удастся. Это принципиальный недостаток испытаний на сжатие. Оптимальная для цилиндрических образцов величина отношения h_0/d_0 лежит в пределах 1...3.

Характер разрушения сжимаемых образцов зависит от величины контактных сил трения. Если они велики, то наблюдается разрушение путем среза (рисунок 21, а). Если они незначительны, то фиксируется разрушение отрывом (рисунок 21, б).



а – схема; б, в, г – виды образцов

Рисунок 20 – Схема испытания на сжатие и формы испытания образцов



а – срез; б – отрыв

Рисунок 21 – Схемы разрушения при испытаниях на сжатие

По диаграмме сжатия определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия аналогична методике для растяжения.

$$\varepsilon = \varphi/l + \varphi.$$

Отсюда, учитывая правило постоянства объема образца в процессе пластической деформации, можно перестроить первичную диаграмму сжатия.

$$V = F_0 h_0 = Fh = \text{const},$$

$$F = F_0 h_0 / h = F_0 / 1 - \varepsilon.$$

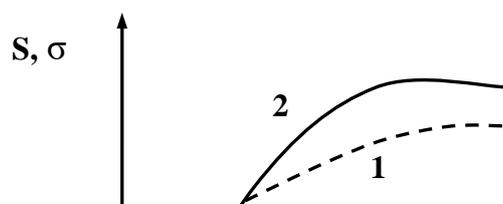
здесь F – площадь поперечного сечения образца.

$$F/F_0 = 1/1 - \varepsilon,$$

$$\varphi = F - F_0 / F_0 = (F/F_0) - 1 = (1/1 - \varepsilon) - 1 = \varepsilon / 1 - \varepsilon,$$

Отсюда видно, что при сжатии, в противоположность растяжению, $S < \sigma$, так как $F > F_0$. Диаграммы истинных напряжений обычно строят в координатах $S - \varepsilon$ (рисунок 22, кривая 1), хотя в качестве меры деформации можно использовать истинное относительное сжатие:

$$e_{сж} = \ln(h_0/h).$$



1 – истинные напряжения; 2 – условные напряжения

Рисунок 22 – Диаграмма напряжений при сжатии

На рисунке 22 нанесена и кривая условных напряжений (кривая 2), которая при сжатии всегда имеет вид, качественно аналогичный диаграмме истинных напряжений, поскольку на первичной диаграмме нет максимума и участка снижения нагрузки.

Истинное напряжение сжатия:

$$S = P/F = P(1 - \varepsilon)/F_0 = \sigma \cdot (1 - \varepsilon) = \sigma \cdot (1/l + \psi).$$

Важной особенностью при сжатии является увеличение площади сечения образца в процессе испытания. Это увеличивает скорость прироста нагрузки на первичных диаграммах сжатия.

Величина прочностных характеристик при сжатии, особенно предела прочности, значительно выше, чем при растяжении. Схемы сжатия используют в технологических пробах для оценки деформационной способности полуфабрикатов и изделий.

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. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 3 Испытания на изгиб и кручение (2 часа)

План лекции

1. Схемы нагружения образца при испытаниях на изгиб.
2. Неоднородное напряженное состояние в изгибаемом образце.

3. Образцы для испытаний на изгиб.
4. Диаграмма изгиба.
5. Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба.
6. Испытания на кручения.
7. Диаграмма кручения.

Испытания на изгиб. Диаграмма изгиба.

Применение испытаний на изгиб обусловлено широкой распространенностью этой схемы нагружения в реальных условиях эксплуатации и большей ее мягкости по сравнению с растяжением, что дает возможность оценивать свойства материалов, хрупко разрушающихся при растяжении. Испытания на изгиб удобны для оценки температур перехода из хрупкого состояния в пластическое (например, у хладноломких о.ц.к.-металлов и интерметаллидов).

При испытаниях на изгиб применяют две схемы нагружения образца, лежащего на неподвижных опорах: 1) нагрузка прикладывается сосредоточенной силой на середине расстояния между опорами и 2) нагрузка прикладывается в двух точках на одинаковом расстоянии от опор. Первая схема нашла большее распространение из-за простоты. Следует учитывать, что вторая схема во многих случаях обеспечивает более надежные результаты, поскольку здесь максимальный изгибающий момент возникает на определенном участке длины образца, а не в одном сечении как при использовании первой схемы.

В изгибаемом образце создается неоднородное напряженное состояние. Нижняя часть образца оказывается растянутой, верхняя – сжатой. Напряжения, связанные с величиной изгибающего момента, различны по длине и сечению образца.

Образцы для испытаний на изгиб не имеют головок. Для изгиба используют прямоугольные или цилиндрические стержни. Для оценки характеристик конструктивной прочности рекомендуется применять образцы большого сечения – 30×30 мм.

Испытания на изгиб можно проводить на любой испытательной машине, используемой для испытаний на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и деформируют изгибающим ножом, который крепят в верхнем захвате машины. Изгиб достигается путем опускания верхнего или подъема нижнего захвата. При этом может быть записана диаграмма изгиба в координатах нагрузка P – стрела прогиба f . Для пластичного материала диаграмма изгиба выглядит, как на рисунке 23. Если материал хрупкий, то кривая обрывается в точке b .

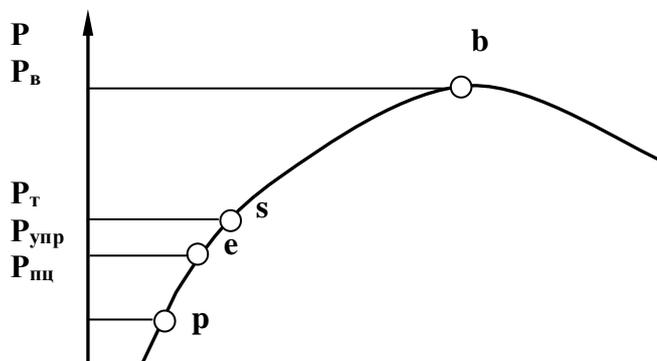


Рисунок 23 – Диаграмма изгиба

Знание величины нагрузок P_{nc} , $P_{упр}$, P_m , P_e позволяет определять пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности при изгибе. Напряжения на стадии упругой деформации обычно рассчитывают по обычным формулам сопротивления материалов.

Условное нормальное напряжение в крайнем растянутом волокне

$$\sigma = M/W,$$

где M – изгибающий момент. В случае нагружения сосредоточенной силой:

$$M = Pl/4;$$

W – момент сопротивления сечения. Для прямоугольного образца.

$$W = bh^2/6,$$

а для цилиндрического

$$W = \pi d^3/32.$$

Рабочей формулой для расчета упругих напряжений при изгибе образцов прямоугольного сечения является

$$\sigma = 3 \cdot P \cdot l/2 \cdot b \cdot h^2,$$

а для цилиндрических образцов

$$\sigma = 8 \cdot P \cdot l/\pi \cdot d^3.$$

Эти формулы часто используют для расчета всех прочностных характеристик при изгибе. Но достаточно точные результаты получают только при определении пределов упругости и пропорциональности.

Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба аналогичны применяемым при растяжении. Допуски и величину деформации при определении предела пропорциональности σ_{nc} , предела упругости $\sigma_{0,05}$, предела текучести $\sigma_{0,2}$ задаются по величине стрелы прогиба, которая связана с относительным удлинением крайнего растянутого волокна в изогнутом образце. Для прямоугольного стержня:

$$f = l^2 \cdot \delta/6 \cdot h.$$

Отсюда, при определении условного предела текучести допуск на остаточный прогиб $f_{0,2}$, соответствующий удлинению крайнего волокна на 0,2% будет

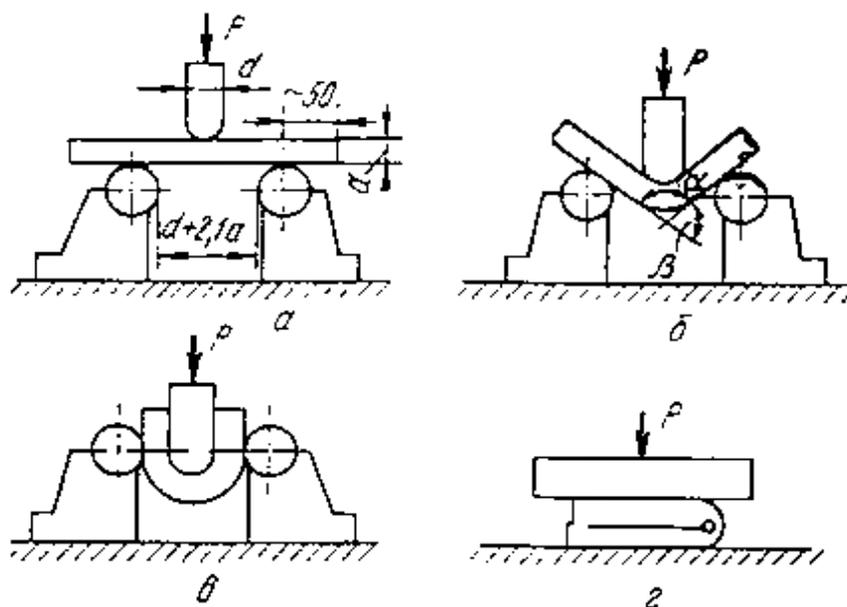
$$f_{0,2} = 0,002 \cdot l^2 / b \cdot h.$$

При испытаниях на изгиб достаточно пластичные материалы не разрушаются. Образец при этом загибается вплоть до параллельности его частей, расположенных по обе стороны от его ножа (рисунок 24, в). Материалы, которые разрушаются при изгибе, могут предварительно деформироваться на разную величину. Разрушение может произойти в любой точке диаграммы изгиба (рисунок 23). У пластически деформирующихся образцов точка максимума b на диаграмме часто совпадает с появлением первой трещины. Иногда образование трещин сопровождается резкими спадами нагрузки на правой ветви диаграммы изгиба (штрихпунктир на рисунке 23).

В качестве характеристики пластичности при изгибе помимо f часто используют угол загиба β дополнительным до 180° к углу изгиба α (рисунок 24). Угол β возрастает по мере повышения деформационной способности материала, а угол α уменьшается.

В заводских условиях применяют технологические пробы, задача которых – оценить пластичность деформированных полуфабрикатов, отливок и изделий (листов, труб, проволоки). Критерием годности продукции может быть заданный угол загиба образцов β (рисунок 24, б); появление первой трещины после загиба на угол β , равный или больше заданного; возможность загиба пластины до параллельности (рисунок 24, в) или соприкосновения сторон (рисунок 24, г).

Существуют также пробы на перегиб листа, ленты и проволоки, в которых фиксируют заданное число перегибов либо количество перегибов, после которых появились трещины, либо образец разрушился.



а – образец перед испытанием, б – загиб до определенного угла,
в – загиб до параллельности сторон, г – загиб до соприкосновения сторон
Рисунок 24 – Технологическая проба на изгиб

Испытания на кручение. Диаграмма кручения

Кручение осуществляют двумя равными по величине и противоположно направленными крутящими моментами, которые прикладываются к концам образца в плоскостях, нормальных к его продольной оси. В рабочей части образца возникает разноименное плоское напряженное состояние с коэффициентом мягкости $\alpha=0,8$ (большее, чем при растяжении). При испытании на кручение до разрушения можно довести любой материал.

Максимальные касательные напряжения при кручении действуют в плоскостях, перпендикулярных оси образца. Наибольшие нормальные напряжения действуют под углом 45° , причем $S_{max}=t_{max}$. Важным следствием неизменности напряженного состояния является постоянство рабочей длины и поперечного сечения образца во время испытания.

Методика испытаний образцов из любых материалов диаметром не менее 5 мм стандартизирована. Образцы должны иметь цилиндрическую рабочую часть и квадратные головки. Образец с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 или 100 мм принят за нормальный. Допускается использование геометрически подобных нормальному образцов, а также трубчатых.

Испытания на кручение проводятся на специальных машинах, которые должны обеспечивать надежную центровку образца, плавность нагружения и отсутствие изгибающих усилий, возможность достаточно точного задания и измерения величины крутящего момента. Используются машины с горизонтальным и вертикальным расположением образца. Максимальный крутящий момент меняется от 6 до 200000 кгс·м. Основные узлы этих машин – станина, привод, от которого вращается активный захват, силоизмеритель, диаграммный механизм, счетчик оборотов и угломер для определения угла закручивания образца.

В качестве меры деформации в процессе испытания фиксируется угол закручивания φ . Для точного измерения этого угла используют зеркальный прибор Мартенса или другой тензомер с большой точностью. Два зеркала крепятся на границах расчетной длины образца. Напротив каждого из зеркал устанавливают шкалы и зрительные трубы, с помощью которых фиксируют отраженные в зеркалах показания шкалы.

В процессе испытания каждый захват машины поворачивается на определенный угол (большой у активного захвата). Угол закручивания образца равен разности этих углов. Однако он включает паразитные деформации зажимов и головок образца. Для их исключения угол закручивания определяют по расчетной длине l_0 , помещая зеркала на некотором расстоянии от головок:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

В области малых углов

$$\operatorname{tg} 2\varphi_1 \approx 2\varphi_1 = a_1 - a_2 / L,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_2 \approx 2\varphi_2 = b_1 - b_2 / L,$$

где a_1, a_2 – отсчеты по шкалам после закручивания; $b_1 - b_2$ – начальные отсчеты.

Тогда угол закручивания

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (a_1 - a_2) - (b_1 - b_2) / 2 \cdot L = \Delta / 2 \cdot L.$$

Зная значения крутящего момента и угла закручивания, можно построить диаграмму кручения в координатах $M_{кр} - \varphi$. Эта диаграмма состоит из участка упругой (Op) и пластической деформации ($pк$). Из-за отсутствия значительного местного сужения ниспадающего участка на диаграмме кручения не бывает. Условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, а также истинный предел прочности выражаются через касательные напряжения.

Истинный предел прочности определяют по формуле, учитывающей поправку на пластическую деформацию:

$$t_k = \frac{4}{\pi \cdot d^3} \left(3 \cdot M_{кр} + \theta \cdot \frac{dM_{кр}}{d\theta} \right),$$

где $M_{кр}$ – наибольший крутящий момент, предшествующий разрушению образца;

θ – удельный угол закручивания перед разрушением (в радианах на 1 мм):

$$\theta = \varphi_1 - \varphi_2 / l_0.$$

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. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (темы 1, 2, 3) [1], [2], [4], [5], [12]

1. Машины для испытаний на растяжение. Схемы испытательных машин.
2. Силоизмерители в машинах для испытаний на растяжение.
3. Схемы испытаний на растяжение при повышенных и отрицательных температурах.
4. Деформационное упрочнение металлических монокристаллов.

5. Деформационное упрочнение поликристаллов.
6. Влияние различных факторов на деформационное упрочнение.
7. Испытания на двухосное растяжение методом выдавливания.
8. Твердорастворное упрочнение.
9. Влияние выделений избыточных фаз.
10. Меры борьбы с трением на опорных поверхностях образцов при испытаниях на сжатие.
11. Схемы напряженного состояния в образце при испытаниях на изгиб.
12. Графические методы определения прочностных свойств по диаграмме изгиба.
13. Машины для испытаний на изгиб.
14. Характеристики пластичности при изгибе.
15. Особенности испытаний на кручение.
16. Машины для испытаний на кручение.
17. Характеристик диаграммы кручения.
18. Определение условных пределов пропорциональности, текучести, упругости и прочности.