

Раздел 1 Напряжения и деформации

Тема 1 Напряжения и деформации (2 часа)

План лекции

1. Современная трактовка физического и технического смысла важнейших механических свойств.
2. Напряжения.
3. Нормальные и касательные напряжения.
4. Тензор напряжений.
5. Деформация.
6. Тензор деформации.

Основные понятия

Деформация – изменение взаимного расположения частиц тела, как правило, вызывающее изменение его размеров и формы.

Упругость – свойство тел деформироваться под нагрузкой и затем, после устранения сил восстанавливать свое первоначальное состояние. Часть деформации, которая исчезает после снятия нагрузки, называется упругой, а та часть, которая остается – остаточной (пластической) деформацией.

Пластичность – свойство материалов под действием внешних нагрузок изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после снятия этих нагрузок.

Прочность – способность материала противостоять нагрузке, не разрушаясь.

Твердость – способность материала противостоять внедрению в него другого материала.

Жесткость – способность материала не гнуться под воздействием приложенной нагрузки.

Вязкость – свойство материалов необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании.

Хрупкость – способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации.

Дислокации – линейные искажения типа обрыва или сдвига атомных слоев, нарушающие правильность их чередования в решетке. Бывают краевые и винтовые дислокации.

Статическая нагрузка – это однократно приложенная нагрузка, плавно и относительно медленно возрастающая от нуля до своей максимальной точки.

Динамическая нагрузка – это однократно приложенная нагрузка, действующая на материал резко, и с большой скоростью возрастающая от нуля до своей максимальной величины.

Повторно-переменная нагрузка – это нагрузка, многократно прикладываемая к материалу, причем скорости возрастания и убывания нагрузки могут быть различные.

Напряжения. Тензор напряжений

Большинство механических свойств выражается через величину *напряжений*.

Понятие «напряжение» введено для оценки величины нагрузки, не зависящей от размеров деформируемого тела. Напряжение является, таким образом, удельной величиной и определяется как соотношение

$$S = \frac{P}{F},$$

где S – напряжение на площадке F , перпендикулярной оси образца, вдоль которой действует сила P (рисунок 1, а).

Для определения величины напряжений в каком-то сечении тела последнее рассекают на две части, затем одну часть тела мысленно отбрасывают, а ее действие на оставшуюся часть заменяют внутренними силами (рисунок 1, б).

В системе СИ напряжения выражаются в ньютонах на квадратный метр (Н/м^2 , МН/м^2). На практике часто используют размерность напряжений кгс/мм^2 ($1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$).

В общем случае сила не перпендикулярна плоскости площадки, на которую она действует. Тогда ее можно разложить на две составляющие: *нормальную* (перпендикулярную к площадке), создающую нормальное напряжение, и *касательную*, действующую в плоскости площадки и вызывающую касательные напряжения (рисунок 1, в). В механических испытаниях определяют именно эти напряжения. Их же используют и в расчетах на прочность. Одни процессы при деформировании и разрушении определяются касательными напряжениями (пластическая деформация, срез), другие – нормальными (разрыв).

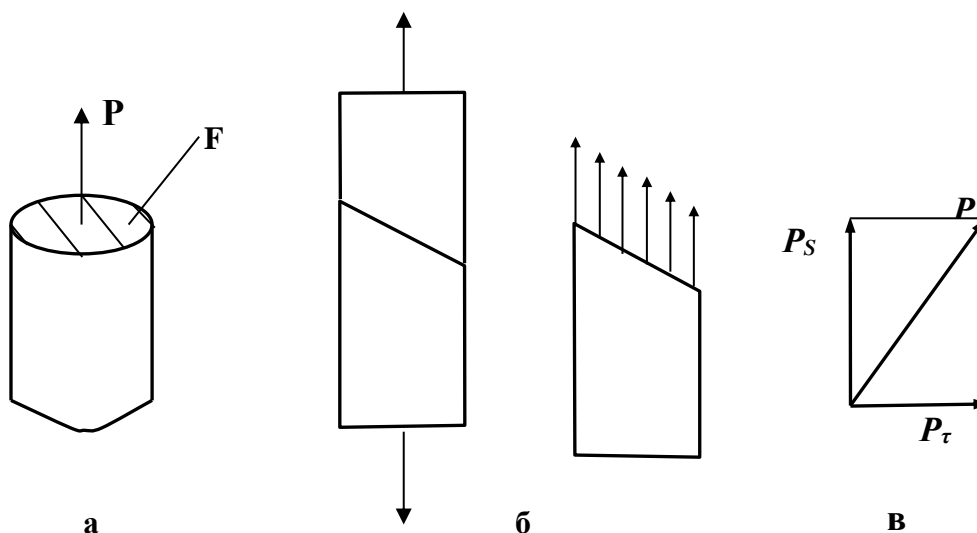


Рисунок 1 – Схемы к определению напряжений

Нормальные напряжения делят на растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные).

При решении реальных задач необходимо иметь возможность оценить напряжения, действующие в любом сечении тела. Для этого используют представление о тензоре напряжений.

Внутри тела, находящегося под действием напряжений, всегда можно выделить бесконечно малый по размерам параллелепипед, ребра которого параллельны произвольно выбранным осям координат (рисунок 2). В общем случае на три его непараллельные грани действуют взаимно уравновешенные векторы напряжений, которые можно разложить на нормальные и касательные. В результате параллелепипед находится под действием девяти напряжений – трех нормальных (S_x, S_y, S_z) и шести касательных ($t_{xy}, t_{xz}, t_{yx}, t_{yz}, t_{zy}, t_{zx}$). Совокупность этих напряжений и есть тензор напряжений, который записывается в такой форме:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_x & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & S_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & S_z \end{pmatrix}.$$

Чтобы выбранный нами параллелепипед находился в равновесии и не вращался, необходимо равенство моментов относительно координатных осей. Поэтому $t_{xy}=t_{yx}$, $t_{zy}=t_{yz}$, $t_{xz}=t_{zx}$ (закон парности касательных напряжений). Следовательно, тензор напряжений содержит фактически не девять, а шесть независимых напряжений. С их помощью можно охарактеризовать любое сложное напряженное состояние. Тензор позволяет определять величину нормальных и касательных напряжений в любой площадке, проходящей через данную точку тела, если известны ее направляющие косинусы (косинус угла между площадкой и соответствующей осью координат) относительно выбранных осей координат.

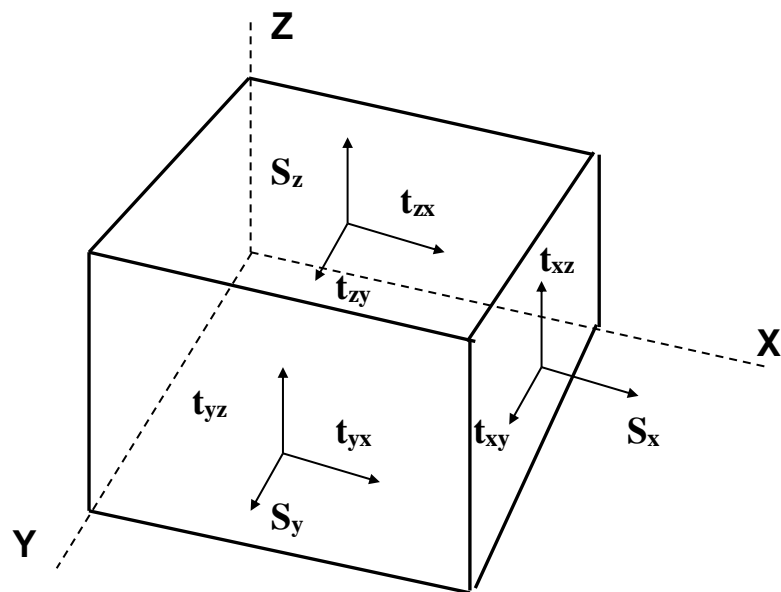


Рисунок 2 – Взаимно уравновешенные напряжения, действующие на грани параллелепипеда

Главные площадки – площадки, на которых действуют только нормальные напряжения, касательные напряжения равны нулю.

При механических испытаниях главные направления напряжений обычно заранее известны, и их можно выбрать в качестве координатных осей. Тогда тензор напряжений упрощается и принимает вид:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix},$$

где S_1, S_2, S_3 – наибольшее, среднее и наименьшее главное нормальное напряжение соответственно.

При любом напряженном состоянии максимальные касательные напряжения τ_{max} действуют на площадках, расположенных под углом 45° к главным осям, а их величина равна полуразности соответствующих главных нормальных напряжений:

$$\tau_{max} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}.$$

Деформация. Тензор деформации

Под действием напряжений все материалы деформируются, то есть изменяют форму и размеры. По результатам механических испытаний оценивают различные характеристики упругой, а чаще остаточной деформации. Наиболее широко используются следующие характеристики деформации: удлинение (укорочение), сдвиг и сужение (уширение) образцов.

Увеличение длины образца в результате деформации обычно характеризуют относительным удлинением:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%,$$

где l_k – конечная длина;

l_0 – начальная длина;

Δl – абсолютное удлинение (рисунок 3, а).

Величина δ является условной характеристикой, поскольку деформация с самого начала развивается на непрерывно изменяющейся длине l и отношение $\Delta l/l_0$ лишено физического смысла.

Истинное относительное удлинение

$$e = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0}.$$

Удлинение и укорочение образца обычно происходит под действием нормальных напряжений. Касательные напряжения вызывают сдвиговые

деформации, которые оценивают по углу сдвига α (в радианах) или по величине относительного сдвига $g = \operatorname{tg}\alpha$ (рисунок 3, б).

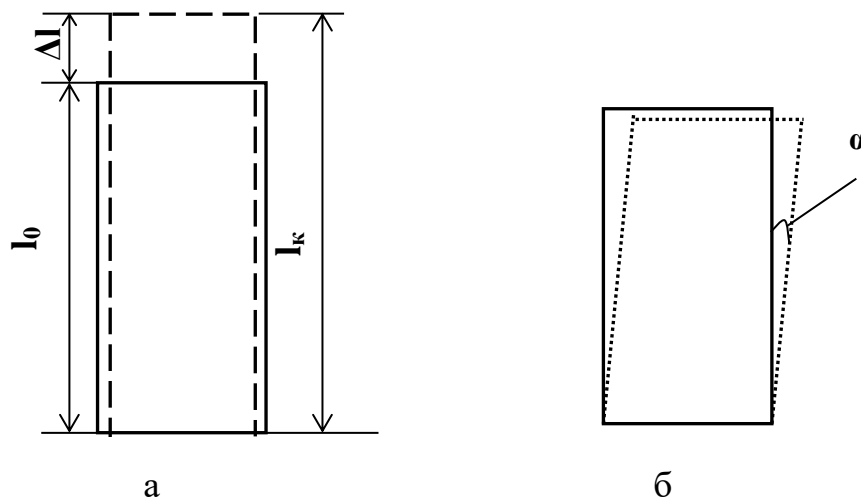


Рисунок 3 – Удлинение (а) и сдвиг (б) при деформации

Относительные удлинения и сдвиги (e и g) – фундаментальные характеристики деформации, которые используются в теориях пластичности и упругости. Совокупность удлинений и сдвигов – тензор деформации – по аналогии с тензором напряжений характеризует любое деформированное состояние в данной точке и позволяет определять e в любом направлении и g в любой плоскости. В случае если три главных направления деформации (в которых сдвиги равны нулю) заранее известны и их можно совместить с осями координат, тензор деформации характеризуется совокупностью трех удлинений:

$$g = \begin{pmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{pmatrix},$$

где e_1 , e_2 , e_3 – наибольшее, среднее и наименьшее по величине удлинение соответственно.

Третьей широко используемой характеристикой деформации является относительное сужение ψ :

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

где F_0 и F_k – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца соответственно.

Между e , δ и ψ существует функциональная связь в области равномерных деформаций, то есть пока величина относительных изменений формы и размеров во всех точках рабочей части образца одинакова. Эта связь следует из условия постоянства объема при пластической деформации.

$$e = \ln(l_k/l_0) = \ln(F_0/F_k) = \ln(1/(1-\psi)) = \ln(1+\delta).$$

Помимо этих трех характеристик деформации, используют и другие, частные. Например, величину деформации при испытании на изгиб можно оценивать по стреле прогиба, а на кручение – по углу скручивания.

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 (тема 1) [1], [2], [3], [9]

1. Истинное и условное удлинение.
2. Функциональная связь между различными характеристиками деформации.
3. Схемы напряженного состояния.
4. Примеры реализации схем напряженного состояния.
5. Условия подобия механических испытаний.