

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ
РАСТЯЖЕНИЯ**

Методические указания
к лабораторной работе

Минск 2004

В методических указаниях излагаются основные физические закономерности упругой деформации, представлена методика определения модуля Юнга материала струны.

Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей всех видов обучения.

Составители:

И.М. Римкевич, П.Г. Кужир, Г.К. Савчук,
Н.П. Юркевич, С.В. Попко, В.В. Зверева

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, профессор И.А. Сатиков,
канд. физ.-мат. наук, доцент В.А. Вилькоцкий

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучить основные физические закономерности упругой деформации растяжения методом растяжения проволоки; определить модуль Юнга исследуемого материала; приобрести навыки пользования индикатором смещения часового типа для измерения абсолютного удлинения материала.

Оборудование: для проведения работы необходимы: индикатор смещения часового типа для измерения абсолютного удлинения, динамометр, проволока исследуемого материала.

Понятие об упругих и пластических деформациях

При проектировании и расчете элементов инженерных сооружений необходимо знать такие механические свойства применяемых материалов, как упругость, прочность, пластичность и твердость. Под действием внешних сил тела деформируются. *Деформацией твердого тела* называется изменение его размеров и объема, сопровождающееся чаще всего изменением формы тела. Только в случае всестороннего сжатия или растяжения форма деформированного тела не изменяется. Деформации сооружений и конструкций, вызванные внешними силами, могут быть очень сложными. Однако сложные деформации всегда можно представить в виде совокупности более простых видов деформаций. К их числу относятся деформации растяжения, сжатия, сдвига, кручения, изгиба. Деформирование тел под действием внешних сил происходит всегда, независимо от того, покоится тело или находится в состоянии неравномерного движения, и является одним из основных его свойств.

При деформациях происходит смещение частиц, находящихся в узлах кристаллических решеток твердых тел, относи-

тельно первоначального положения. При этом внутри тела возникают силы, стремящиеся вернуть частицы в положение, которые они занимали до деформации. **Внутренними силами** или **силами упругости** называются силы, возникающие между различными частями деформированного тела. По своей природе силы упругости являются **электростатическими**. С увеличением внешних сил увеличиваются и внутренние силы, которые стремятся вернуть тело в недеформированное состояние. Увеличение внутренних сил происходит только до известного предела, характерного для данного материала. Внешние силы могут оказаться настолько большими, что внутренние силы тела при данных его размерах не смогут их уравновесить и тело разрушится.

Упругостью называется свойство твердых тел устранять деформацию, вызванную внешними силами, после прекращения их действия. **Абсолютно упругими** называются тела, у которых после прекращения действия внешних сил полностью исчезает деформация, восстанавливаются первоначальные размеры и форма. Такую деформацию называют **упругой**. Деформация, сохраняющаяся в теле полностью или частично после прекращения действия внешних сил, называется **пластической** или **остаточной деформацией**. Тела, для которых характерны такого вида деформации, называются **пластическими телами**.

Разделение тел на упругие и пластические в некоторой степени условно. Строго говоря, все деформации после прекращения действия внешних сил не исчезают полностью, т.е. являются пластическими. Но если величины остаточных деформаций малы настолько, что в данных условиях ими можно пренебречь, то деформацию можно считать упругой. Так, в некоторых случаях остаточными деформациями можно пренебречь, если они не превышают 0,1 % от максимальных значений, которые достигаются под действием внешних сил. В других случаях этот предел должен быть снижен до 0,01 % и

4

т.д. Является ли деформация упругой или пластической, зависит также от материала тела и от величины приложенных внешних сил. Если сила не превосходит некоторой предельной величины (предела упругости данного материала), то деформация будет упругой. Если же этот предел будет пройден, то возникающая деформация становится пластической.

При изучении упругих деформаций будем рассматривать тела идеально упругими, изотропными и имеющими простую форму. **Идеально упругими** называются тела, для которых существует однозначная зависимость между действующими силами и вызываемыми ими деформациями. Тело считается **изотропным**, если его свойства по всем направлениям одинаковы. В лабораторном эксперименте исследуются тела простой формы, т.е. тела, у которых длина значительно больше их поперечных размеров, а ось – прямая линия.

Силы и деформации при растяжении

Для выяснения закономерностей, связывающих силу и деформацию, рассмотрим простейший вид деформации – растяжение (сжатие) однородного стержня (рис. 1).

Приложим к основаниям стержня растягивающие или сжимающие силы \vec{F} . Под действием внешней силы \vec{F} стержень будет деформирован, т.е. растянут или сжат. В стержне возникнут внутренние силы \vec{F}_y , с которыми каждая часть стержня действует на соседнюю с ней часть. Так как стержень однородный, то можно считать, что по поверхности любого сечения S внутри стержня (см. рис. 1) упругие силы распределены равномерно.

5

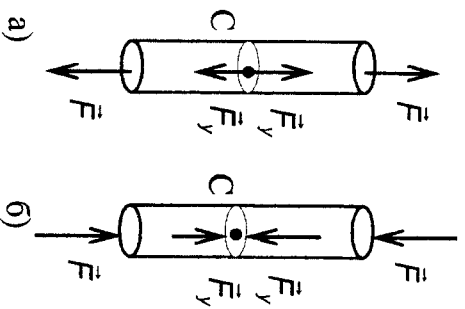


Рис. 1. Внутренние силы \vec{F}_y и внешние силы \vec{F} , действующие на однородный стержень при растяжении (а) и сжатии (б)

Мысленно вырежем часть стержня и рассмотрим условия его равновесия (рис. 2).

На вырезанную часть с одной стороны будет действовать внешняя сила \vec{F} . Для того чтобы эта часть тела оставалась в равновесии, необходимо с другой стороны стержня по всему сечению приложить внутренние силы \vec{F}_y , которые на рис. 2 обозначены стрелками. Из условия равновесия следует, что силы, приложенные к концам этого кусочка, равны друг другу по величине и противоположны по направлению ($\vec{F}_y = -\vec{F}$).

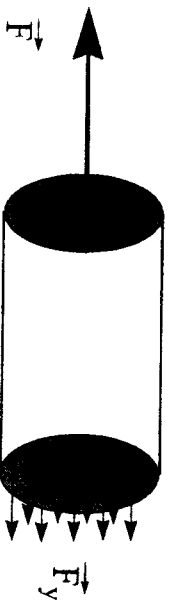


Рис. 2. К определению условия равновесия внутренних и внешних сил

Данное условие справедливо для любого отрезка стержня. Поэтому в любом поперечном сечении стержня возникают внутренние силы \vec{F}_y , равные по величине внешней силе \vec{F} . Величина упругих (внутренних) сил при растяжении и сжатии не зависит от выбора места сечения по длине стержня.

Величину упругой силы, действующей на единицу площади поперечного сечения, называют **напряжением**. Напряжение σ , возникающее в растягиваемом стержне, равно

$$\sigma = \frac{F_y}{S}. \quad (1)$$

Напряжение будет направлено так же, как сила \vec{F}_y , то есть перпендикулярно к плоскости поперечного сечения стержня. В случае сжатия стержня напряжение также вычисляется по формуле (1). Напряжения при растяжении и сжатии численно равны и отличаются только знаком.

Обозначим длину недеформированного стержня l_0 . После приложения внешних сил длина его будет равна l .

Абсолютным удлинением называется величина

$$\Delta l = l - l_0. \quad (2)$$

В случае деформации сжатия значение Δl характеризует абсолютное укорачивание и имеет отрицательный знак.

Относительным удлинением стержня называется величина

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (3)$$

Для деформации сжатия величина ε называется **относительным сжатием**. Для деформации растяжения $\varepsilon > 0$, для деформации сжатия $\varepsilon < 0$. Значения Δl и ε соответственно характеризуют величину деформации.

Внешние нагрузки и деформации, возникшие в стержне, взаимосвязаны. Впервые эта связь была установлена Робертом Гуком в 1678 году. Согласно закону Гука **при упругой дефор-**

мации абсолютное удлинение тела пропорционально приложенной к нему внешней силе. Аналитически эту зависимость можно записать в виде

$$F = k \Delta l, \quad (4)$$

где k – коэффициент жесткости тела, который зависит от материала и геометрических размеров тела.

Как показывает опыт, напряжение при упругой деформации пропорционально относительной деформации (*закон Гюка*):

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5)$$

где α – *коэффициент продольной упругости* – величина, численно равная относительному удлинению при напряжении, равном единице.

Модулем продольной упругости или модулем Юнга называют величину, обратную коэффициенту продольной упругости: $E = 1/\alpha$. С учетом этого закон Гюка можно записать в виде

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{или} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (6)$$

Закон Гюка справедлив только для малых деформаций.

Относительное удлинение – величина безразмерная. Следовательно, размерности модуля Юнга и напряжения совпадают: $[\sigma] = [E] = \text{Па} (\text{Н/м}^2)$. Величина модуля Юнга зависит только от материала стержня и его физического состояния. Если в формуле (6) положить $\Delta l = l_0$, то получится, что $\sigma = E$. Поэтому физический смысл модуля Юнга состоит в том, что модуль Юнга численно равен такому напряжению, при котором относительное удлинение равно единице, т.е. длина тела удваивается.

Недостаток такого определения физического смысла модуля Юнга заключается в том, что при таких больших деформациях закон Гюка почти для всех тел не выполняется: тело либо разрушается, либо нарушается пропорциональность между деформацией и напряжением. Например, железный стержень разрушится уже при напряжении, примерно равном $0,002E$.

Вывод рабочей формулы для определения модуля Юнга

Для опытного определения модуля Юнга может быть использован закон Гюка для деформации растяжения. Продольное растяжение состоит в увеличении длины тела под действием растягивающей внешней силы F . Упругое растяжение прекращается, когда упругая сила, согласно третьему закону Ньютона, уравновесит внешнюю силу: $F_y = F$. По закону Гюка

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (7)$$

учитывая, что $\sigma = \frac{F_y}{S}$, получим

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F_y}{S}. \quad (8)$$

С учетом условия $F_y = F$ соотношение (8) можно записать в виде

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}, \quad (9)$$

где l_0 – первоначальная длина тела;

Δl – изменение длины при нагрузке F .

Площадь поперечного сечения для тела цилиндрической формы (провода) равна $S = \frac{\pi d^2}{4}$, где d – диаметр провода. Тогда, согласно формуле (9), модуль Юнга будет равен

$$E = \frac{F l_0 \cdot 4}{\Delta l \pi d^2}. \quad (10)$$

Таким образом, из формулы (10) следует, что для **вычисления модуля Юнга E необходимо** измерить диаметр проволоки d , начальное значение ее длины l_0 и абсолютное удлинение Δl , соответствующее заданному значению внешней силы F , растягивающей проволоку. Формулы (7)-(10) справедливы и для деформации сжатия.

Диаграмма растяжения

Диаграммой растяжения называется зависимость величин напряжения σ от величины относительного удлинения ε (рис. 3).

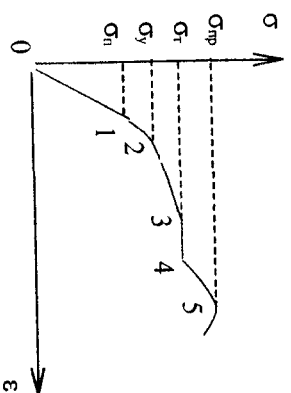


Рис. 3. Диаграмма растяжения

При анализе диаграммы можно выделить следующие основные участки и определить прочностные характеристики деформируемого тела. Участок 0-1 соответствует линейной зависимости напряжения от величины деформации. На этом участке деформация является обратимой, т.е. после снятия нагрузки форма и размеры образца восстанавливаются. Участок 01 называется **областью упругости**, а величина $\sigma_{п1}$ – пределом

10

пропорциональности. **Предел пропорциональности** $\sigma_{п1}$ – наибольшее напряжение растяжения, при котором сохраняется пропорциональность между силой и удлинением, т.е. выполняется закон Гюка.

Участок 1-2 соответствует области **упругой деформации**. На этом участке закон Гюка не выполняется. Величина σ_y называется пределом упругости. **Предел упругости** σ_y – максимальное напряжение, при котором в материале еще не наблюдается остаточная деформация. Практическое определение предела упругости представляет собой довольно сложную процедуру. Для многих тел величина предела упругости близка к пределу пропорциональности $\sigma_y \approx \sigma_{п1}$.

Участок 2-3-4 соответствует области остаточной деформации. На участке 3-4 деформация возрастает без увеличения напряжения, т.е. тело начинает «течь» (область пластических деформаций). Это явление называется текучестью материала. **Предел текучести** σ_t – минимальное напряжение, при котором деформация возрастает без увеличения нагрузки.

Диаграмма деформации завершается разрушением образца. Точка 5 соответствует пределу прочности $\sigma_{пр}$. **Пределом прочности** $\sigma_{пр}$ называется напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой телом перед разрушением.

Описание установки для проведения эксперимента

Схема установки для проведения эксперимента представлена на рис. 4.

К верхней поперечине 1 жестко крепится конец исследуемой проволоки 2. Нижний конец проволоки соединен тягой с динамометром 3, к которому присоединен червячный механизм 4, служащий для передачи воздействия через динамометр на нижний конец проволоки. Удлинение проволоки измеряется индикатором смещений часового типа 5, измери-

11

тельный стержень 6 которого опирается на круглый столик 7, закрепленный к концу проволоки и связанный с тягой динамометра. Тяга имеет возможность перемещаться вверх или вниз и практически не допускает боковых перекосов.

Это позволяет надежно контролировать индикатором абсолютное удлинение проволоки при ее деформациях растяжения и сжатия.

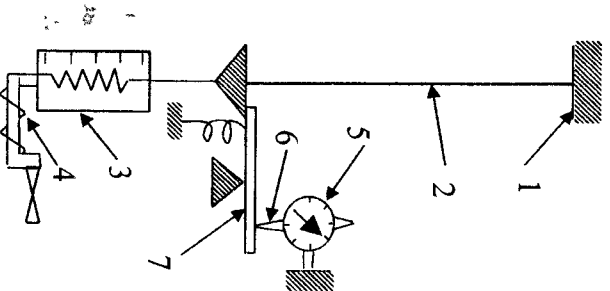


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – верхняя поперечина; 2 – проволока; 3 – динамометр; 4 – червячный механизм; 5 – индикатор смещений часового типа; 6 – измерительный стержень; 7 – круглый столик

На рис. 5 показан индикатор смещений часового типа, циферблат которого имеет две шкалы.

Абсолютное удлинение проволоки определяется как

$$(k \cdot 100 + k_0) \cdot 0,01 \text{ мм,}$$

где k – количество полных оборотов большой шкалы, отсчитываемое по малой шкале;

k_0 – показание стрелки большой шкалы.

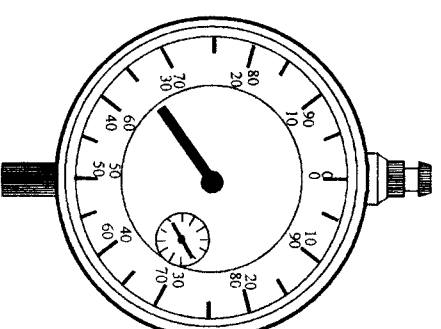


Рис. 5. Индикатор смещений часового типа

При подъеме измерительного стержня индикатора (прямой ход) показания читают по наружным цифрам большой шкалы (увеличение по часовой стрелке), при опускании (обратный ход) – по внутренним цифрам большой шкалы (увеличение против часовой стрелки).

Для установки стрелки прибора на ноль имеется рифленая обойма, которая может поворачиваться в любую сторону до тех пор, пока нулевое деление шкалы не совпадет с направлением часовой стрелки.

Контрольные вопросы

1. Что следует понимать под деформацией тела? Какие виды деформаций вы знаете?
2. Как можно объяснить возникновение упругих сил? Какова их природа?

Литература

3. Каков смысл абсолютного и относительного удлинения?
4. Как формулируется и какова форма записи закона Гука при упругой деформации?
5. Какой физический смысл коэффициента продольной упругости? В каких единицах он измеряется?
6. Что называется модулем Юнга и каков его физический смысл?
7. Что следует понимать под пределом пропорциональности, пределом упругости, пределом текучести и пределом прочности?
8. Выведите расчетную формулу для определения модуля Юнга.

1. Физика конденсированных сред / П.Г. Кужир, А.А. Баранов, А.И. Каряный, И.П. Юркевич. – Мн.: УП «Технопринт», 2002. – 210 с.
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – М.: Высш. школа, 2000. – 494 с.