

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

1-5

Лабораторная работа № 1-5

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Методические указания

Иркутск 2011 г.

Печатается по решению научно-методического совета Иркутского государственного университета

В работе представлены основные положения по теории механических свойств твёрдых тел. Описан классический метод определения модуля Юнга металлов по изгибу. Работа предназначена для студентов 1 курса естественных факультетов.

Библиогр. 4 назв. Ил. 7 .

Составитель: канд. физ.-мат. наук, доц. Л.И.Алексеева.

(каф.общей и космической физики)

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доц. В.Л.Каллихман.

Цель работы

1. Изучение теории механических свойств твёрдых тел, знакомство с различными видами деформаций.
2. Определение модуля упругости латунного и стального стержней по изгибу.

Основные приборы и принадлежности

Стойка с призмами, латунный и стальной стержни, набор грузов по 50 и 100г. каждый, отсчётный микроскоп, штангенциркуль, линейка.

Краткая теория

Незакреплённое абсолютно твёрдое тело под действием внешней силы будет двигаться с ускорением в соответствии со вторым законом Ньютона. Закреплённое твёрдое тело под действием внешней силы будет деформироваться.

Твёрдыми называют тела, которые обладают постоянством формы и объёма. Кристаллические твёрдые тела имеют правильную геометрическую форму (кристаллическую решётку) и повторяющееся на протяжении всего кристалла расположение составляющих его частиц (атомов, ионов, молекул). Каждая частица в кристаллической решётке испытывает действие сил межмолекулярного взаимодействия (притяжения и отталкивания). Совместное действие этих сил приводит к тому, что частицы совершают колебания около средних положений равновесия, называемых узлами кристаллической решётки.

У металлов в узлах кристаллической решётки находятся положительные ионы, образовавшиеся после отрыва от атомов внешних (валентных) электронов, которые образуют электронный газ коллективизированных свободных частиц. Возникшая при этом *металлическая связь* является специфическим видом химической связи между ионами кристаллической решётки и электронным газом. За счёт электростатических сил электроны уравнивают силы отталкивания между положительными ионами. При расстояниях между ионами, равных периоду кристаллической решётки, образуется устойчивое состояние металлического кристалла.

На рис.1 представлена зависимость сил притяжения (1), отталкивания (2) и результирующей силы взаимодействия от расстояния (r) между атомами (молекулами, ионами) кристаллов различных типов. Причём в узлах кристаллической решётки ($r=r_0$) действие сил притяжения ($F_{пр}<0$) и

отталкивания ($F_{\text{отт}} > 0$) уравновешены, и результирующая сила межмолекулярного взаимодействия равна нулю, а потенциальная энергия взаимодействия минимальна.

Если под действием внешней силы расстояние r между атомами будет изменено, например, увеличено $r_1 > r_0$ или уменьшено $r_2 < r_0$, то в этом случае результирующая сила окажется не равной нулю. То есть сила упругости, возникающая в образце, будет иметь характер, соответственно, притяжения или отталкивания (рис.1).

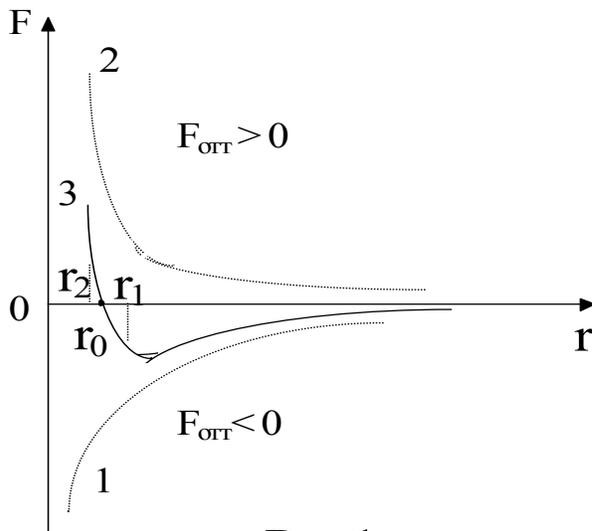


Рис.1

Деформация называется **упругой** ($r \approx r_0$), если после прекращения действия внешних сил, тело принимает первоначальную форму и объём. При этом частицы кристаллической решётки возвращаются в первоначальное положение равновесия ($r=r_0$). Деформации, которые сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил, т.е. происходит необратимая

перестройка кристаллической решётки, называются **пластическими** (или остаточными). Переход упругой деформации в пластическую может происходить при длительных воздействиях на тело даже малых внешних сил.

Среди всех деформаций, возникающих в твёрдых телах под действием внешних сил, можно выделить пять основных видов деформаций: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. В теории упругости доказывается, что все эти виды деформаций могут быть сведены к одновременно происходящим деформациям растяжения (сжатия) и сдвига.

Внешние силы, создавая **усилие** равное отношению внешней силы к поперечному сечению образца

$$\sigma_{ус} = \frac{F_{вн}}{S}, \quad (1)$$

смещают частицы твёрдого тела из их положений равновесия, а межмолекулярные силы препятствуют этому смещению. Внутри создаётся **напряжение** численно равное силе упругости, приходящейся на единицу площади S поперечного сечения образца

$$\sigma_{напр} = \frac{F_{упр}}{S} \quad (2)$$

Благодаря взаимодействию частиц тела друг с другом напряжение (σ) передаётся во все точки тела, и весь объём образца оказывается в напряжённом состоянии.

Количественной мерой, характеризующей степень деформации является относительная деформация (ε) равная отношению абсолютной деформации (Δx) к первоначальному значению величины (x), характеризующей форму или размер тела

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \quad (3)$$

Закон Гука: напряжение, возникающее в упруго деформированном теле, прямо пропорционально его относительной деформации

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4)$$

Здесь E – коэффициент упругости (модуль Юнга), численно равный напряжению, которое возникает при относительной деформации равной единице. Модуль упругости характеризует упругие свойства материала, измеряется в паскалях ($1 \text{Па} = 1 \text{Н/м}^2$), для стали имеет величину $E = 20 \cdot 10^{10} \text{Н/м}^2$. Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия.

Растяжение (сжатие). Простейшей деформацией является продольное или односторонне растяжение (сжатие), сопровождающееся увеличением (уменьшением) длины тела под действием внешней растягивающей (сжимающей) силы F (рис.2). Деформация прекращается при

условии $F = F_{упр}$. Относительная деформация $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta l}{l}$, где $\Delta l = l_1 - l$ –

изменение длины тела под действием силы F . По закону Гука $\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$,

тогда

$$F = E \frac{S}{l} \Delta l; \quad F = k \Delta l \text{ или } F = - k \Delta x, \quad (5)$$

где $k = E \frac{S}{l}$ – коэффициент упругости, характеризует упругие свойства образца; Δx – абсолютная деформация тела. Знак минус означает, что сила упругости и абсолютная деформация имеют противоположные направления.

Следует заметить, что, когда длина тела увеличивается, то площадь его поперечного сечения несколько уменьшается, тем самым компенсируется удлинение. Если растяжение тела сравнительно невелико, то изменением площади можно пренебречь. Деформацию растяжения испытывают тросы подъёмных кранов канатных дорог, струны музыкальных инструментов. Сжатию подвергаются колонны, стены, фундаменты, зданий.

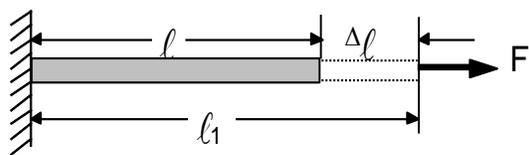


Рис.2.

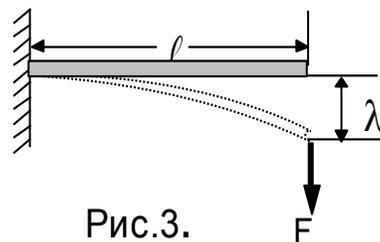


Рис.3.

Изгиб. При изгибе стержня (рис.3) абсолютная деформация определяется стрелой прогиба λ , а относительная – отношением стрелы прогиба к первоначальной длине стержня

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l} \quad (6)$$

При деформации изгиба верхний слой образца испытывает деформацию, растяжения, нижний – сжатия. Средний слой остаётся нейтральным и не испытывает деформации. Поскольку слои, близкие к нейтральному, испытывают меньшую деформацию, то детали машин, конструкций, работающие на изгиб, провода линий электропередач и т.д. выгодно делать полыми, что даёт экономию материалов и значительно снижает вес деталей. В результате длительной эволюции кости животных и птиц, а также стволы некоторых растений (например бамбук) приобрели трубчатое строение, что обеспечивает максимальную прочность скелета и ствола при данной его массе.

Сдвиг. Сдвигом называется деформация тела при которой все его плоские слои, параллельные некоторой плоскости сдвига, не искривляясь и не изменяясь в размерах, смещаются параллельно друг другу вдоль действия касательной силы F , параллельной плоскости сдвига (рис.3).

При малых углах сдвига относительная деформация $\varepsilon = \operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$ и определяется по формуле

$$\varepsilon = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta x}{h}, \quad (7)$$

где Δx – абсолютный сдвиг параллельных слоёв относительно друг друга, h – высота деформируемого тела.

При действии силы, создающей в теле напряжение кручения, в каждом малом сегменте возникают деформации сдвига (рис.4). Относительная деформация определяется по формуле (7).

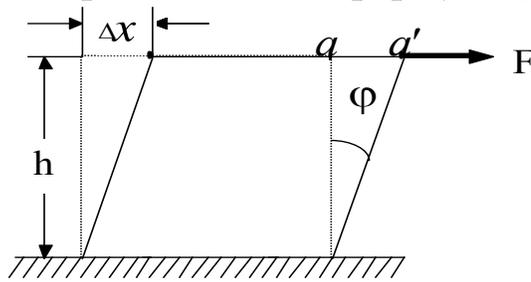


Рис.4.

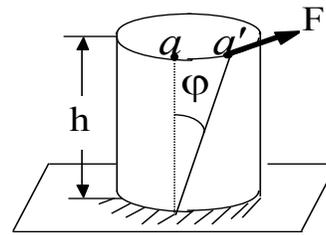


Рис.5.

Диаграмма напряжений – это зависимость напряжений σ от относительной деформации $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ при одностороннем растяжении.

Рассмотрим качественно диаграмму напряжений для металлического образца (рис.5).

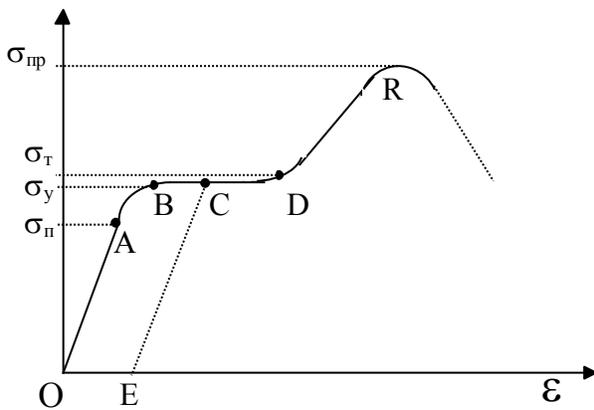


Рис.6.

Из рисунка видно, что линейная зависимость (4) $\sigma = E\varepsilon$, установленная Гуком, выполняется лишь в очень узком диапазоне деформаций (участок OA) до предела пропорциональности ($\sigma_{п}$). Причём для этого участка OA модуль Юнга численно равен тангенсу угла наклона кривой. При дальнейшем увеличении

напряжения деформация ещё остаётся упругой, хотя линейность кривой нарушается, и до **предела упругости** (σ_y) пластические деформации не возникают (участок AB). За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации. После прекращения действия силы обратный ход кривой идёт по линии CE. На участке BD деформация возрастает без увеличения напряжения, т.е. тело как бы "течёт". Этот участок кривой называется **областью текучести** (σ_T). Материалы, для которых область текучести значительна называются вязкими, для которых она практически отсутствует – хрупкими. В области текучести производится холодная обработка металла: ковка, штамповка, прокатка, протяжка, и т.д.

При дальнейшей нагрузке образца за т.Д происходит вначале упрочнение материала до предела прочности ($\sigma_{пр}$), а затем наступает его разрушение.

В настоящей работе изучается только область упругих деформаций, которые возникают в стержне при его изгибе под действием нагрузки. Стрела прогиба будет тем больше, чем больше нагрузка, кроме того, она зависит от формы стержня, его размеров и материала, из которого он изготовлен. Измерив экспериментально стрелу прогиба стержня, можно вычислить модуль Юнга деформации изгиба по формуле (8). Вывод расчётной формулы довольно сложен, поэтому здесь приводиться окончательная формула

$$E = \frac{PL^3}{4\lambda ab^3}, \quad (8)$$

где P – нагрузка в ньютонах, L – длина стержня, a – его ширина, b – высота, λ – стрела прогиба в метрах.

Порядок выполнения работы

Описание прибора.

Прибор состоит из вертикальных стоек M , N (рис.7), укрепленных неподвижно на платформе. Верхние концы стоек оканчиваются призмами, на которые укладываются исследуемые стержни. Посредине на стержне имеется платформочка, на которую кладутся грузики, вызывающие изгиб стержня. Стрела прогиба измеряется с помощью отсчетного микроскопа. Отсчет по микроскопу следует брать по верхнему краю стержня.

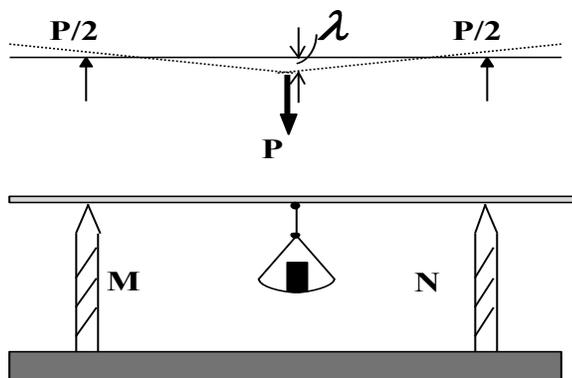


Рис.7.

1. Узнать у преподавателя цену деления микроскопа.
2. Измерить длину L исследуемого стержня с точностью до 1 мм.

3. При помощи штангенциркуля в нескольких местах измерить толщину b и ширину a стержня и определить их средние значения .
4. Испытуемый стержень поместить на подставку, совмещая метки на нем с гранями призмы .
5. Наводя микроскоп на стержень, добиться его отчетливого изображения. Взять отсчет n_1 по верхнему краю стержня.
6. На платформочку поместить один из грузов (50 г), взять отсчет n , что даст нам возможность вычислить стрелу прогиба $\lambda_1 = n_1 - n_0$ (в делениях шкалы микроскопа).
7. Нагрузить стержень грузом в 100 г. Вычислить $\lambda_2 = n_2 - n_0$.
8. Прибавляя каждый раз по 50 г, нагружаемую массу увеличить до 300 г. Вычисляя $\lambda_i = n_i - n_0$ и силу *нагрузки* $P_i = m_i g$, построить график зависимости стрелы прогиба от нагрузки $\lambda_i = f(P_i)$. (i – номер текущего измерения)

Испытать, таким образом, два стержня, результаты наблюдений занести в таблицу.

Таблица 1

Наименование стержня	Длина	Высота	Ширина	Начальный отсчёт	Масса	Нагрузка	Отсчет по микроскопу	Стрела прогиба	Стрела прогиба	Модуль упругости
	L, м	b, м	a, м	n_0 , дел	m, кг	P, Н	n_{01} , дел	λ , дел	λ , м	E

9. Пересчитать стрелу прогиба в метрах.
10. Подставив в формулу (8) найденные значения, вычислить модуль Юнга (E).
11. Найти среднее значение модуля упругости для каждого стержня и оценить абсолютную и относительную погрешность измерений. Для расчёта погрешности составить таблицу, состоящую из трёх столбцов: для E_i , ΔE_i и $(\Delta E_i)^2$.
12. Результат эксперимента записать в виде $E = \bar{E} \pm \Delta E$.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о строении кристаллов. Как возникает металлическая связь?
2. Что такое деформация? Расскажите о простейших видах деформации..
3. Объясните возникновение сил упругости при различных видах деформаций с учётом сил межмолекулярного взаимодействия?
4. Дайте определение абсолютной и относительной деформации при различных видах деформации.
5. Дайте определение напряжения, возникающего в твёрдом теле при деформации. Сформулируйте закон Гука.
6. Расскажите о диаграмме напряжений. Приведите примеры хрупких и пластических тел. Дайте определение предела прочности.

Библиографический список

1. Мерион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. -М.: Высш. шк., 1986. - 624 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 3 т. – М.: Лань, 2007. – 3 тома.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. –541 с.
4. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – М.: Оникс, Мир и Образование, Харвест, 2006. – 1056 с.

Алексеева Лариса Ивановна

Изучение механических свойств твёрдых тел

Методические рекомендации

Подписано в печать 26.01.2001. Формат 60X84 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Гарнитура Times.

Усл. печ.л. 0,8. Уч. -изд. л. 0,7. Тираж 150. План 2001г. Поз.25

Редакционно-издательский отдел
Иркутского государственного университета
664003, Иркутск, б.Гагарина,36