

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра физики твердого тела

Н.В. БОЛТАКОВА, А.М. САЛАХОВ

УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Учебно-методическое пособие

Казань – 2017

УДК 539.37
ББК 22.251

*Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 11 от 26 апреля 2017г.*

Рецензент:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры теоретической физики КФУ **Р.Г. Деминов**

Болтакова Н.В., Салахов А.М.

Упругая и пластическая деформация: Учебно-методическое пособие / Н. В. Болтакова, А. М. Салахов. – Казань: Казан. ун-т, 2017.– 43 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 03.03.02 «Физика» при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения заданий, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Казанский университет, 2017
© Болтакова Н.В., 2017
© Салахов А.М., 2017

Данная работа входит в блок «Физика твердого тела» дисциплины «Физика конденсированного состояния». Предварительно проводится ознакомление с теоретическим материалом, затем необходимо согласно описанию подготовить установку, которая будет использоваться для проведения исследований свойств заданных материалов. В рамках этой работы нужно определить модуль упругости и получить диаграмму растяжения.

ВВЕДЕНИЕ

Под нагрузкой материалы деформируются. Это связано с тем, что нагрузка вызывает перемещение частиц тела относительно друг друга. Деформация сопровождается изменением величин межатомных сил, мерой которого является *механическое напряжение*. Напряжение определяется отношением прикладываемой силы F к площади поверхности S , на которую действует данная сила, т. е. силой, приходящейся на единичную площадку сечения. Исходя из определения в международной системе единиц (СИ) механическое напряжение измеряется в паскалях: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Механическое напряжение, приложенное к единичной площади сечения по нормали к сечению, называется нормальным механическим напряжением σ .

Механическое напряжение, приложенное к единичной площади сечения в плоскости сечения, называется касательным механическим напряжением τ .

Далее мы будем рассматривать только нормальное механическое напряжение, поэтому под напряжением будем понимать именно его.

Деформации разделяются на два типа:

- обратимые (*упругие*) – исчезают после окончания действия приложенных сил;

- необратимые (*неупругие, пластические, ползучести*) – остаются после окончания действия приложенных сил.

Деформации ползучести – это деформации, возникающие под действием длительного воздействия на тело постоянного напряжения.

Пластические деформации – это необратимые деформации, вызванные изменением напряжений. Пластичностью называется способность вещества получать большие остаточные деформации без разрушения.

Ползучесть и пластичность внешне схожи, но механизм ползучести имеет преимущественно диффузионную природу, а пластичность связана с быстрым скольжением вдоль атомных плоскостей. При температурах,

близких к температуре плавления, различие между этими видами деформации исчезает.

Наиболее простые виды деформации – это:

- растяжение / сжатие,
- сдвиг,
- изгиб,
- кручение.

Практически любую деформацию можно представить одновременным наложением нескольких из указанных видов простой деформации, которые, в конечном счете, могут быть сведены к двум первым видам.

Растягивающая сила вызывает удлинение материала. Если на куб со стороны L действует растягивающая сила, он удлиняется на величину ΔL вдоль оси растяжения. Если проволоку подвергать натяжению, она растягивается. Если напряжение ниже так называемого предела упругости E_L (рис. 1), проволока возвращается к её первоначальной длине после прекращения деформирующего воздействия.

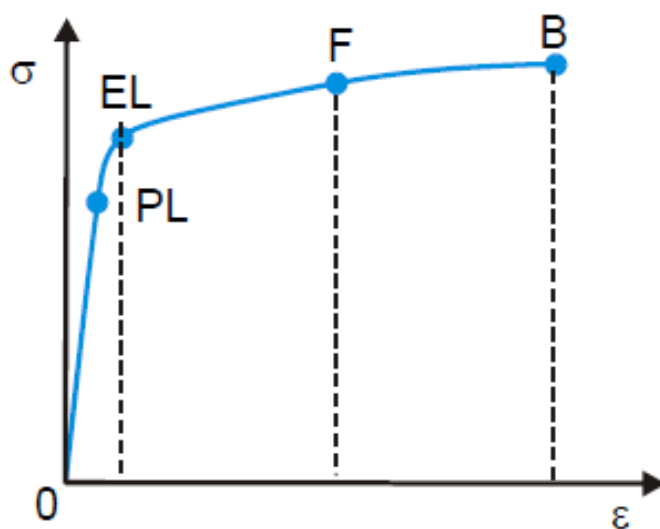


Рис. 1. Схематическое представление диаграммы напряжение-деформация [1]

Растяжение в упругой области определяется относительным изменением длины:

$$\varepsilon = \Delta L/L, \quad (1)$$

где ε – относительное удлинение, ΔL – абсолютное удлинение, L – начальная длина (до деформации). Величина ε характеризует деформацию проволоки (стержня) [2].

Напряжение определяется силой F , которая действует перпендикулярно на площадь поперечного сечения S проволоки:

$$\sigma = F/S. \quad (2)$$

Если деформации малы в сравнении с размерами проволоки, растяжение ε пропорционально напряжению σ с некоторым коэффициентом E , называемым модулем упругости (*модулем Юнга*):

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (3)$$

Как видно из графика $\sigma(\varepsilon)$, модуль упругости равен тангенсу угла наклона касательной, проведенной к линейному участку кривой нагружения (рис. 1).

Уравнение (3), отражающее экспериментальные данные, носит название закон Гука. Эта формула действительна и при сжатии. Закон Гука выполняется только в области упругих деформаций.

Для большинства металлических материалов закон Гука действует на участке, на котором удлинение пропорционально растягивающему напряжению (рис. 1). Для некоторых материалов, например, алюминия, закон Гука действует только в течение части упругого диапазона. Для этих материалов определяется пропорциональный лимит P_L (рис. 1), т. е. диапазон, в котором ошибки, связанные с линейной аппроксимацией, пренебрежимо малы.

Если напряжение превышает этот предел пропорциональности P_L , деформации не пропорциональны прикладываемому напряжению, однако после снятия напряжения деформации еще пока исчезают. За пределом упругости E_L будет сохраняться остаточная деформация. Предел упругости соответствует наименьшему напряжению, при котором остаточная деформация может быть измерена.

По мере дальнейшего роста напряжения деформация увеличивается. При достижении точки текучести F небольшое увеличение напряжения вызывает значительное увеличение удлинения. Затем следует область, где сечение значительно уменьшается, пока образец не разрывается в точке B .

Чтобы выявить природу упругости, необходимо рассмотреть атомную структуру материала. На величину модуля упругости влияют два фактора:

- межатомные силы,
- способ упаковки атомов.

Напомним, что различают следующие типы межатомной связи:

- химическую связь – ионную, ковалентную и металлическую, это сильные связи (они разрываются при температурах от 1000 до 4000 К);
- физические Ван-дер-Ваальсовские и водородные связи, являющиеся сравнительно слабыми (разрываются при температурах 100–500 К).

Было бы неверно противопоставлять одни типы химической связи другим, поскольку природа химической связи едина, в ее основе лежит электромагнитное взаимодействие электронов и ядер атомов, однако распределение электронной плотности различно для разных видов связи (рис. 2).

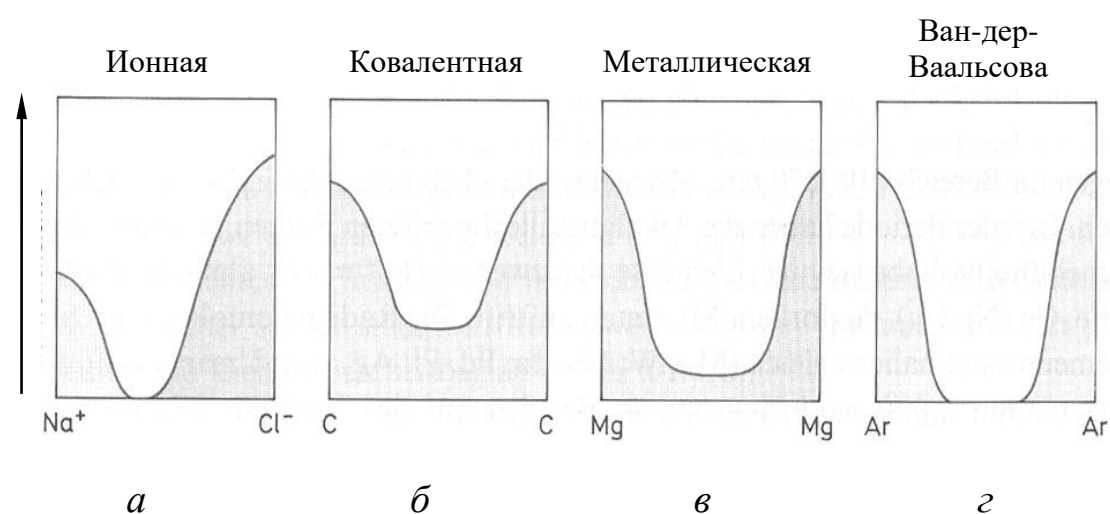


Рис. 2. Распределение электронной плотности в различных видах связи: ионной в хлориде натрия NaCl (а), ковалентной в углероде С (б), металлической в магнии Mg (в), Ван-дер-Ваальсовой в аргоне Ar (г)

Значения модуля упругости существенно различаются для конструкционных материалов с различным преобладающим типом связей (табл. 1).

Таблица 1

Иерархия связей различного типа и соответствующие им значения E

Тип связи	Пример	E , ГПа
Ковалентная	C–C	200–1000
Металлическая	Cu–Cu	60–300
Ионная	Na–Cl	32–96
Водородная	H ₂ O–H ₂ O	8–12
Ван-дер-Ваальсовская	межмолекулярная в полимерах	2–4

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЖЕСТКОСТИ

Твердые тела, в отличие от жидких и газообразных, характеризуются сопротивлением сдвиговым деформациям, что позволяет веществу сохранять форму под воздействием внешних сил. Указанная особенность тесно связана с дальнедействующей природой межатомного взаимодействия, приводящего к упорядоченному расположению частиц (атомов, молекул или ионов), из которых составлено твердое тело. Анализ образования связи позволяет выявить зависимость потенциальной энергии от расстояния между атомами.

Модель Ван-дер-Ваальсовых сил связи между атомами или молекулами связана с взаимной ориентацией заряженных электрических диполей [3]. Электромагнитные силы связей являются наиболее сильными из всех известных взаимодействий на атомно-молекулярном уровне. К этому типу относится ионная связь, имеющая место у щелочных металлов и галлоидов.

После потери элементарного заряда (электрона) атом щелочного металла превращается в положительный ион, а атом галоида после присоединения электрона становится отрицательным ионом. Энергию притяжения двух ионов с равными по величине, но противоположными по знаку зарядами q на расстоянии r друг от друга можно представить в виде

$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная [3].

На рисунке 3, *a* нижняя кривая показывает зависимость энергии притяжения $U(r)$ при уменьшении r , когда $\lim_{r \rightarrow 0} U(r) = -\infty$ [3]. Под действием силы притяжения ионы стремятся максимально сблизиться друг с другом. Этому на малых расстояниях ($r \rightarrow 0$) препятствуют силы отталкивания. Энергия отталкивания, показанная верхней кривой, оценивается по степенному закону

$$U = \frac{B}{r^n},$$

где B и n – некоторые постоянные и $n \gg 1$ ($\approx 8-10$).

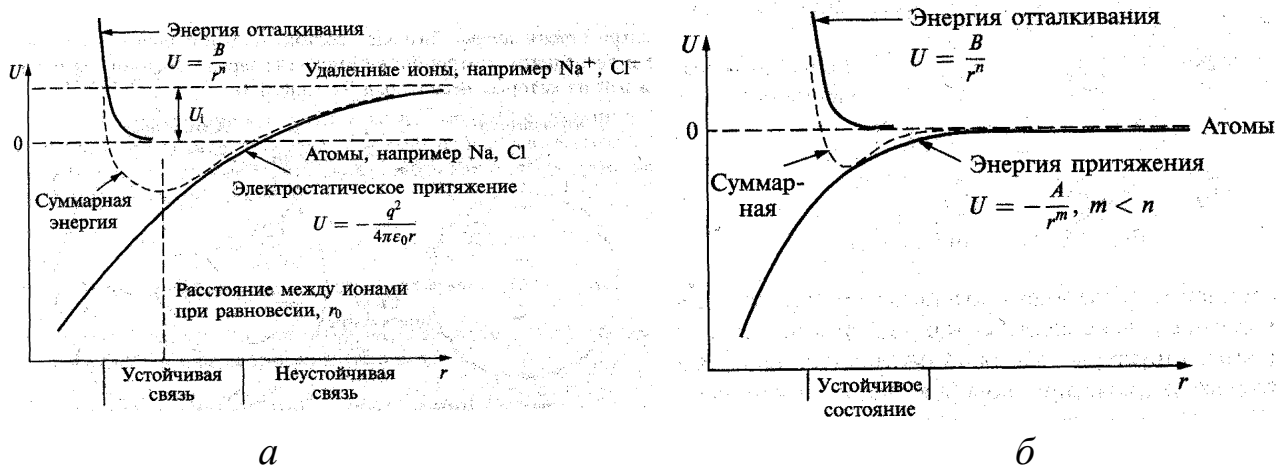


Рис. 3. Энергетический анализ образования ионной (а) и ковалентной (б) связи

Результирующая энергия взаимодействия ионов

$$U(r) = \frac{B}{r^n} - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

представлена штриховой кривой. Оптимальное расстояние между двумя взаимодействующими ионами r_0 соответствует условию оптимальной энергии связи двух ионов. При $r = r_0$ сила притяжения ионов равна по абсолютной величине силе отталкивания. В этом случае получаем соотношение для константы B при известном расстоянии r_0 [3]:

$$B = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 n} r_0^{n-1}.$$

Если известен потенциал $U(r)$, силу F можно вычислить по формуле $F = dU/dr$.

Сила F равна нулю в положении равновесия $r = r_0$. Если атом вывести из положения равновесия, возникает сила противодействия. Для малых значений смещения $r - r_0$ сила пропорциональна величине смещения как при растяжении, так и при сжатии.

Жесткость связи S определяется формулой

$$S = \frac{dF}{dr} = \left. \frac{d^2U}{dr^2} \right|_{r=r_0}.$$

Такой связи присуща линейная упругость, характерная для закона Гука. Понятие жесткости связи, основанное на зависимости энергии от расстояния между атомами, объясняет природу упругости.

УПАКОВКА АТОМОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Прежде чем переходить к оценкам модуля упругости и их сравнению с экспериментом, необходимо вспомнить, как из отдельных атомов формируется материал, т. е. рассмотреть *упаковку* атомов.

Преобладающая часть металлов (80 %) при кристаллизации формирует один из трех видов решетки (рис. 4–7): гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру с плотнейшей упаковкой атомов, объемноцентрированную кубическую (ОЦК) структуру, гексагональную структуру с плотнейшей упаковкой атомов (ГПУ).

Li	Be												
Na	Mg											Al	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb

Рис. 4. Кристаллическая структура металлов в нормальных условиях:

■ – ГЦК, ■ – ОЦК, ■ – ГПУ, ■ – другие

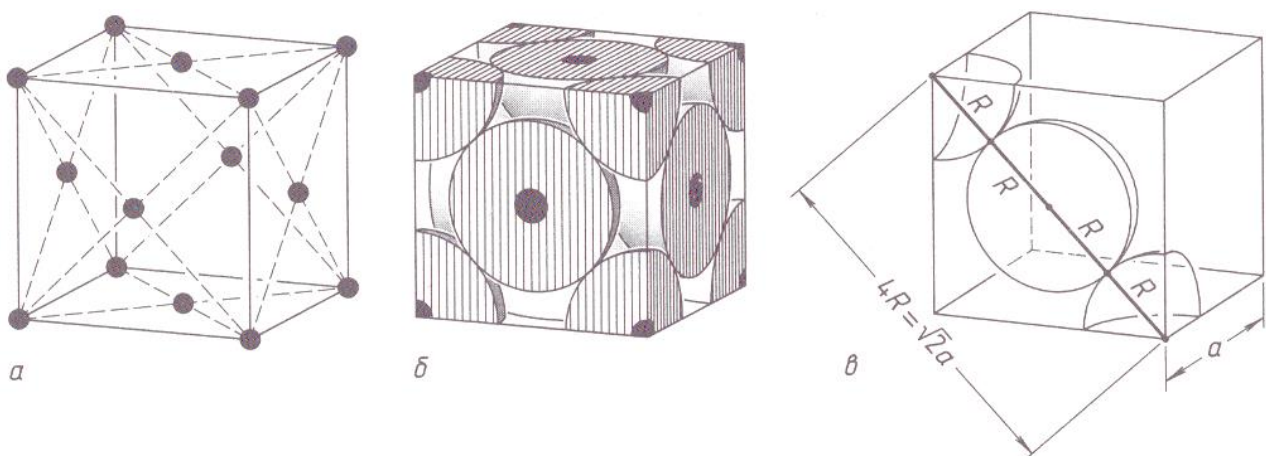


Рис. 5. Гранецентрированная кубическая решетка: элементарная ячейка (а); элементарная ячейка, заполненная сферами (б); касание атомов вдоль направления малой оси (в)

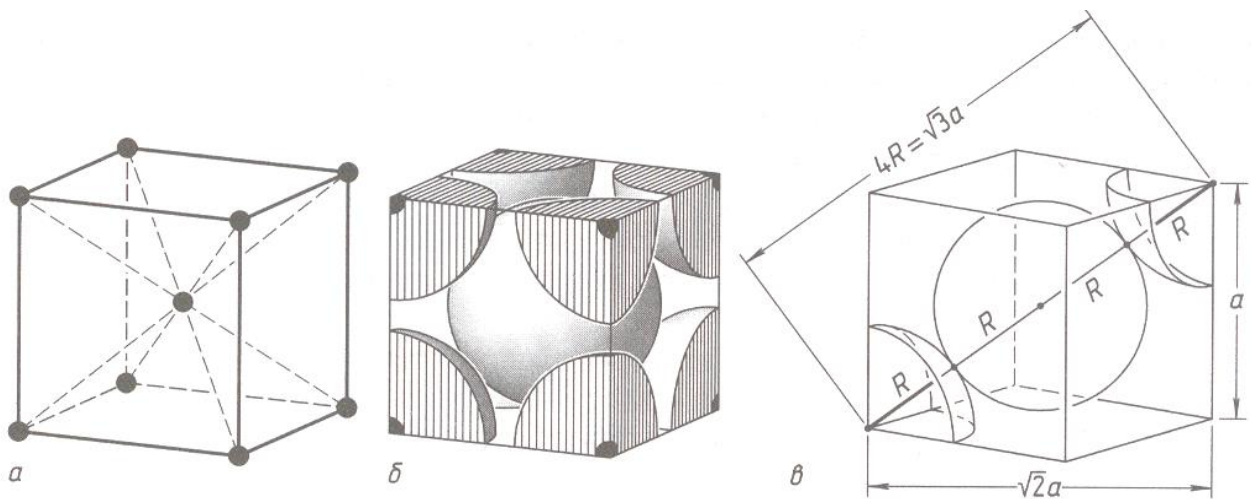


Рис. 6. Объемноцентрированная кубическая решетка: элементарная ячейка (а); элементарная ячейка, заполненная сферами (б); касание атомов по диагонали (в)

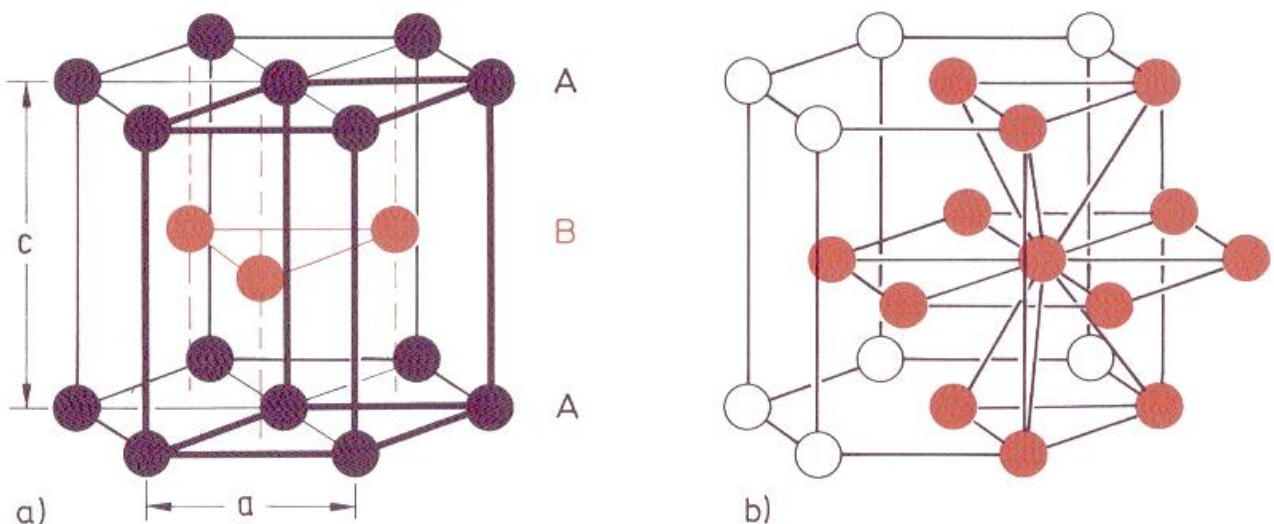


Рис. 7. Гексагональная плотнейшая упаковка: расположение атомов, $c/a = 1,633$ (а); каждый атом имеет 12 ближайших соседей (б)

Отметим, что в структуре ГПУ упаковки шаров в плоскости слоя и по вертикали к нему *различны*, а в структуре ГЦК упаковка *одинакова* в любой из трех основных плоскостей куба (т. е. менее анизотропна). Несмотря на различия, эти два типа плотнейших шаровых упаковок демонстрируют общие черты:

- 1) доля пространства, занятого шарами (коэффициент заполнения), в обоих случаях равен 74,05 %;
- 2) координационное число атома составляет 12.

К типичным характеристикам металлов можно отнести следующее:

- плотность кристаллической структуры;
- металлический блеск, непрозрачность;
- растяжимость и пластичность;
- высокие электро- и теплопроводность.

Упаковка атомов в полимерах значительно более сложная. Напомним, что все полимеры состоят из длинных молекул, в которых роль «позвоночника» играют атомы углерода, ковалентно связанные друг с другом. Длинные полимерные молекулы соединены гораздо более слабыми ван-дер-ваальсовскими связями (рис. 8). Стекла имеют аморфную структуру (рис. 9).



Рис. 8. Полиэтилен низкой плотности. Изображены как аморфные, так и кристаллические области.

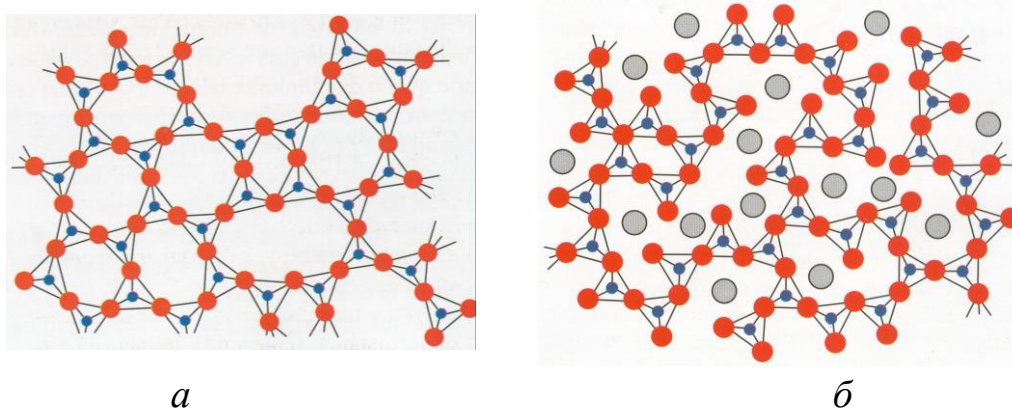


Рис. 9. Упаковка атомов в аморфном диоксиде кремния SiO_4 – кварцевом стекле (а). При добавлении углекислого натрия Na_2CO_3 (сода, карбонат натрия) часть связей в SiO_4 разрушается и образуется натриевое стекло (б)

ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Модуль упругости

Закон Гука применим только для очень малых нагрузок ($\epsilon \leq 10^{-4}$). При больших деформациях будут наблюдаться сначала небольшие отклонения от пропорциональности между напряжением и деформацией, которые будут возрастать при увеличении деформации. Макроскопически эта нелинейность обнаруживается с трудом, и в технике ею обычно пренебрегают. Для упругой деформации характерно, что твердое тело самопроизвольно возвращается к исходному недеформированному состоянию при прекращении внешнего воздействия.

Однако металлические материалы могут деформироваться до удлинений много больших, чем предел разрушений (при упругой деформации), так как они деформируются пластично. Это означает, что изменение формы сохраняется при снятии внешней нагрузки.

Значения модуля упругости различных материалов приведены в таблице 2. Анализ данных таблицы показывает, что модуль упругости большинства керамических материалов и металлов лежит в сравнительно узком диапазоне значений, от 30 до 300 ГПа. Для большинства кристаллических материалов модуль упругости лежит именно в этом диапазоне. Полимеры отличаются от них радикально, и их модуль упругости намного ниже, иногда на несколько порядков.

Плотные керамические материалы, подобно металлам, обладают точно определенным модулем упругости. Значение модуля упругости керамики в целом выше, чем у металлов, что отражает высокую жесткость ионной связи простых оксидов и ковалентной связи силикатов.

Несмотря на открытие и массовое применение значительного числа новых неметаллических материалов, металлы по-прежнему играют огромную роль в промышленности, к тому же металлы составляют 80 % элементов Периодической системы.

Значения модуля Юнга для различных материалов

Материал		E , ГПа
Керамика	алмаз	1000
	карбид вольфрама WC	450–650
	керметы (карбиды кобальта, вольфрама)	400–530
	карбид кремния	430–445
	оксид алюминия Al_2O_3	385–382
	нитрид кремния Si_3N_4	280–310
	оксид магния	240–275
	муллит	145
	кварц	94
	натриевое стекло	69
	гранит	62
	кальцит, мрамор, известняк	31
	графит	27
	лед	9,1
Металлы	железо	196
	низколегированные стали	196–207
	мягкая сталь	200
	чугуны	170–190
	медь	124
	титан	116
	золото	82
	алюминий и его сплавы	69–79
Полимеры	меламины	6–7
	полиэфиры	1,8–3,5
	нейлон	2–4
	поливинилхлорид	0,2–0,8
	полиэтилен высокой плотности	0,7
	полиэтилен низкой плотности	0,2

Диаграмма деформирования

По способности материалов к пластической деформации мы можем разделить их на три группы по уровню деформации разрушения ε_f :

- *хрупкие материалы*, $\varepsilon_f \leq 0,1 \%$ (керамические материалы, твердые материалы);

- *пластичные материалы*, $\varepsilon_f \approx 10 \%$ (металлы и промышленные сплавы);

- *сверхпластичные материалы*, $\varepsilon_f \approx 1000 \%$ (специальные мелкозернистые сплавы).

Абсолютно упругое тело восстанавливает свою первоначальную форму мгновенно после прекращения действия внешних сил.

Если после прекращения их действия тело сохраняет новую форму или возвращается в исходное состояние лишь постепенно, то его называют неабсолютно упругим или пластичным.

Нелинейно упругим телом называется такое тело, у которого напряжения и деформации связаны нелинейными зависимостями.

Зависимость деформации от напряжения абсолютно упругого тела линейная. Наклон зависимости «деформация–напряжение» при сжатии и растяжении равен модулю упругости материала.

Другой тип упругого поведения, который называют анэластичным (квазиупругим), проявляется в небольшом отклонении зависимости «деформация–напряжение» от линейной (рис. 10). Все твердые тела проявляют некоторую анэластичность. Примерами квазиупругой силы служат силы упругости, возникающие при малых деформациях упругих тел. Даже если деформация материала является обратимой, кривые напряжения и разгрузки не совпадают, и в этом цикле рассеивается энергия, величина которой соответствует площади заштрихованной области.

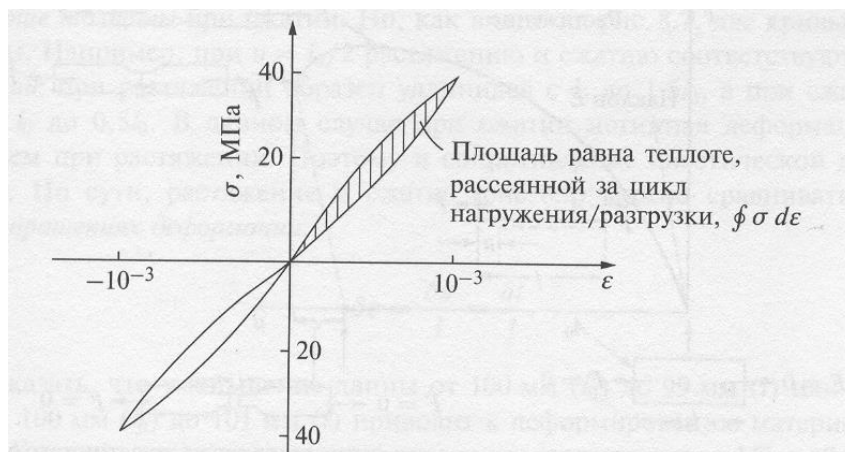


Рис. 10. Диаграмма деформирования квазиупругого твердого тела

Диаграмма деформирования нелинейно-упругого твердого тела соответственно имеет нелинейный характер (рис. 11). С *нелинейной упругостью* приходится сталкиваться главным образом при описании механических свойств полимерных материалов и композиций. Такую зависимость напряжения от деформации имеют каучуки. Материал является упругим, и после снятия нагрузки он возвращается в исходное состояние.

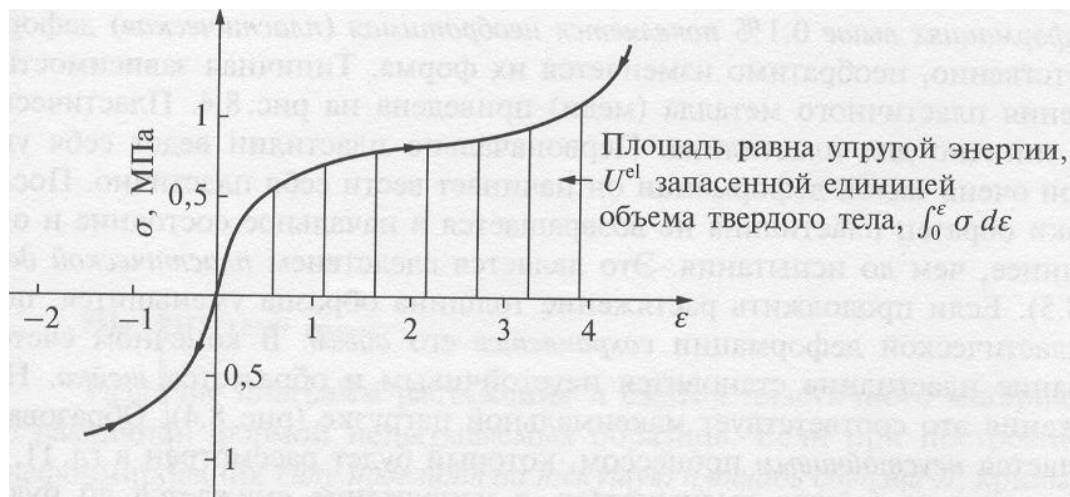


Рис. 11. Диаграмма деформирования нелинейно-упругого твердого тела

Рассеивание энергии при наложении и снятии нагрузки может быть полезным, например, если требуется погасить колебания или шум (*демпфировать*). Полимеры и мягкие металлы имеют высокую демпфирующую способность (высокие потери). Но часто демпфирование совершенно нежелательно, например в пружинах. Очень низкую демпфирующую способность имеют пружинная сталь, бронза и стекло.

Уникальная способность сшитого каучука состоит в почти обратимом поведении при высоких деформациях. Однако во многих материалах при деформациях выше 0,1 % появляется необратимая (пластическая) деформация и, соответственно, необратимо меняется их форма.

Пластическое поведение материала обычно изучают путем растяжения (рис. 12). Соответственно вводятся следующие понятия.

Предел текучести – напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки [4]:

$$\sigma_T = F_T/S_0,$$

где F_T – нагрузка инициации пластического течения, S_0 – начальная площадь сечения. На диаграмме напряжений σ_T обозначается точкой, в которой начинается практически горизонтальный участок диаграммы, называемый площадкой текучести (точка C на рис. 12).

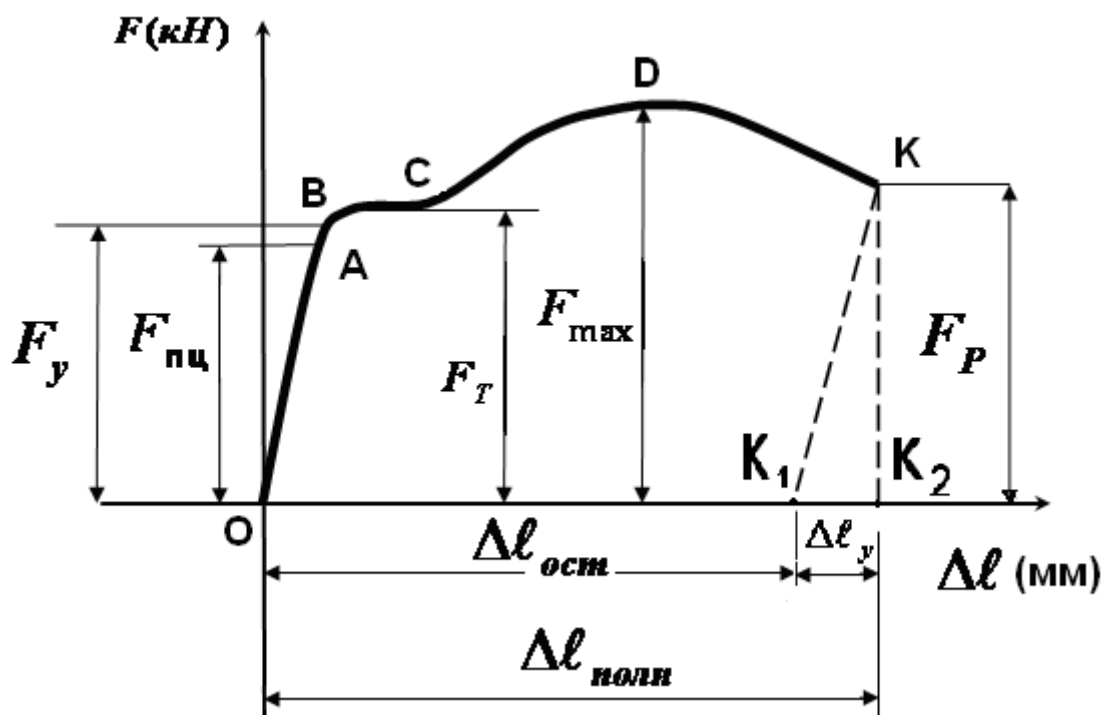


Рис. 12. Диаграмма растяжения металлического стержня [4]

Предел прочности при растяжении – наибольшее напряжение, которое испытывает образец перед разрушением

$$\sigma_{TS} = F_{\max}/S_0,$$

где F_{\max} – величина наибольшей нагрузки, предшествующей разрушению образца (точка D на рис. 12).

Механизмы пластической деформации

Из курса материаловедения известно, что когда материал ползет под растягивающей нагрузкой или сжимается при испытании на твердость, в нем происходит движение дислокаций, которые представляют собой возмущение кристаллической структуры. Величина нагрузки, необходимой для перемещения дислокаций, обычно составляет значительную долю от модуля упругости – примерно $E/30$.

При пластической деформации материал изменяет форму. Соответственно, атомы кристаллов вынуждены менять свои позиции, т. е. должно происходить изменение кристаллической структуры (рис. 13). Рентгеновское дифракционное исследование показывает, однако, что кристаллическое строение при пластической деформации не меняется, поскольку брегговские рефлексы на диаграммах Дебая-Шеррера не изменяются. Сохранение кристаллической структуры при изменении внешней формы возможно, только если целые блоки кристалла смещаются параллельно

кристаллографическим плоскостям на расстояния, кратные межатомным. Микроскопические исследования показывают, что внутри кристаллита линии скольжения параллельны или состоят из параллельных линий (рис. 14).

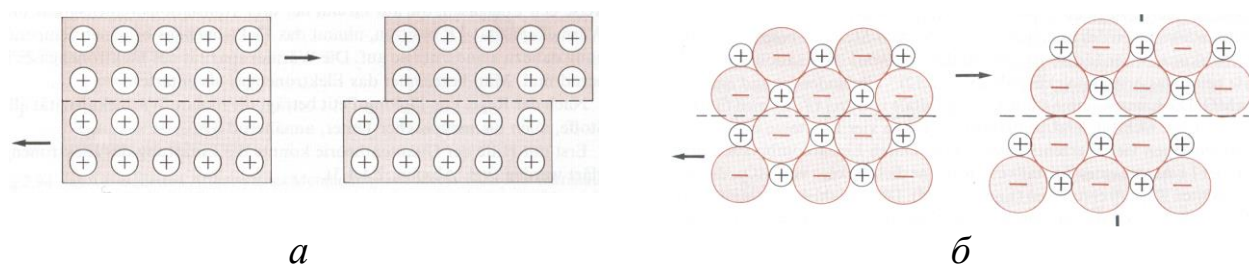


Рис. 13. Пластическая деформация ионного кристалла (а) и металла (б)

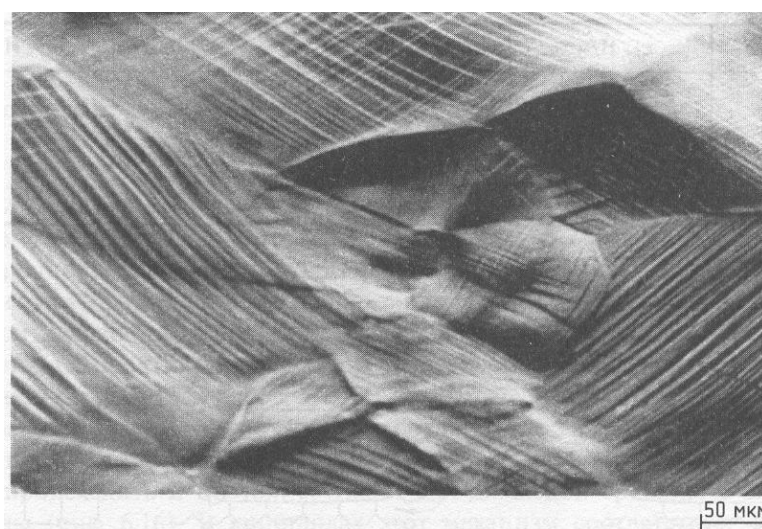


Рис. 14. Линии скольжения на поверхности прокатанного поликристаллического Fe_3Al

Чистый металл или твердый раствор представляют собой одну фазу. В принципе можно получать монокристаллы металлов. Однако это требует высоких затрат, что оправдывает себя только при производстве высокотехнологичных изделий, например, монокристаллических лопастей турбин. Как правило, однофазный металл имеет поликристаллическую структуру, т. е. состоит из миллионов мелких кристаллов или зерен, «склеенных» по границе зерен. Благодаря такой структуре границы зерен имеют особые свойства (рис. 15). На границе фаз плотность материала ниже, что увеличивает энергию поверхности, которая обычно имеет величину около $0,5 \text{ Дж/м}^2$. Чтобы заполнить пространство между двумя различно ориентированными кристаллами, атомы на их границе должны быть упакованы менее упорядоченно. Плотность упаковки атомов на границе может составлять всего 50 %.

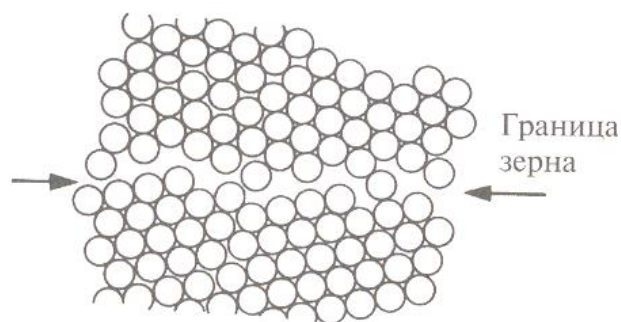


Рис. 15. Типичная структура границы зерен

Хорошо известно, что у металлов (как и любых других пластичных материалов) прочность при сжатии практически равна прочности при растяжении. Однако для хрупких материалов, к которым относится большинство керамических изделий, ситуация совершенно иная. Здесь *прочность при сжатии примерно в 15 раз будет превышать прочность при растяжении*.

При низких температурах металлы с ОЦК ячейкой (вольфрам, хром и многие виды стали) становятся хрупкими и разрушаются путем скола, хотя при комнатной температуре они имеют весьма высокую вязкость разрушения. Только в металлах с ГЦК структурой (медь, свинец, алюминий) вязкость разрушения не зависит от температуры. В остальных металлах движение дислокаций имеет *термоактивированный характер*. При низких температурах тепловое движение неактивно, и дислокации движутся не столь легко, как при комнатной температуре. В результате предел текучести повышается, а зона пластичности у кончика трещины становится столь малой, что механизм разрушения меняется с пластического разрушения на скол. Это называется *переходом от пластического к хрупкому поведению*.

Известно, что кристаллическая структура, обеспечивающая минимум энергии решетки при одной температуре, при другой температуре может оказаться энергетически невыгодной. Так, олово при охлаждении изменяет свою кристаллическую решетку и становится намного более хрупким. Это обстоятельство имело следствием то, что пуговицы на мундирах солдат наполеоновской армии, изготовленные из сплава олова, разламывались во времена суровых русских морозов. У сталей в зависимости от их состава подобные переходы могут происходить уже при температуре около 0 °С. Поэтому зимой вероятность разрушения кораблей, мостов и морских нефтедобывающих платформ намного выше, чем летом. Нечто подобное происходит и со многими полимерами при переходе от стеклообразного к высокоэластичному состоянию.

Вязкость разрушения

Сопротивление распространению трещин, или вязкость разрушения, является одной из наиболее важных характеристик конструкционных материалов [5]. Распространение трещины сопровождается работой пластической деформации [6]. Величина силы G , необходимой для распространения трещины на единицу длины, определяется при плосконапряженном состоянии с помощью соотношения [5]:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E},$$

где σ – приложенное напряжение, a – длина трещины, E – модуль упругости. Параметр G называют *вязкостью разрушения*. Величина G достигает критического значения G_c , когда произведение $\sigma^2 a$ становится критическим. Начиная с этого момента, трещина растет самопроизвольно, затраты энергии для ее дальнейшего роста не нужны, освобождающаяся упругая энергия при раскрытии трещины превышает поверхностную энергию, необходимую для образования новой поверхности разрушения. Трещина становится неустойчивой и, распространяясь по телу материала, приводит к его разрушению. Значение параметра G_c может служить мерой сопротивления материала распространению трещин или мерой вязкости разрушения. Величина G_c имеет размерность силы на единицу длины [6].

Вязкость разрушения керамических материалов примерно в 50 раз ниже, чем у пластичных. При высокой вязкости разрушения распространение трещины затруднено (это характерно, например, для меди). Напротив, стекло растрескивается очень легко.

Прочность материала пропорциональна его вязкости разрушения и обратно пропорциональна квадратному корню длины самой крупной микротрещины. В процессе производства изделий строительной керамики в них возникает множество трещин размером до 2 мм, что значительно снижает их прочность.

Общей чертой *хрупкого разрушения* (ему подвержены сварные корпуса судов, трубы газопроводов и сосуды высокого давления) является наличие исходных трещин, что часто происходит из-за низкого качества сварки. Хрупкое разрушение вызывается ростом трещин, которые внезапно становятся неустойчивыми и распространяются в материале со скоростью звука.

Рассмотрим, что происходит под нагрузкой с *пластичным* металлом, содержащим трещину. При достаточно высоком напряжении разрушение произойдет вследствие роста этой трещины. Если исследовать поверх-

ность металла после разрушения, мы увидим, что поверхность разрушения крайне неровная, что свидетельствует о большой совершенной пластической работе. Это можно объяснить тем, что напряжение вблизи кончика трещины выше среднего напряжения. Иными словами, в кончике трещины имеется концентрация напряжения.

Пластическое течение в кончике трещины постепенно приводит к ее затуплению. Важная особенность вязкого разрушения состоит в том, что на пластическое течение расходуется большое количество энергии. Чем больше зона пластичности, тем больше поглощаемая энергия. Именно поэтому пластичные металлы имеют высокую вязкость разрушения. Этот механизм разрушения типичен и для других материалов, например, пластилина. Вязкость полимеров также обусловлена процессом пластического течения.

Прочность хрупких материалов

Если рассмотреть поверхность разрушения керамического материала, например, стекла, мы увидим такую картину. Вместо неровной поверхности – довольно гладкую поверхность, свидетельствующую о незначительной пластической деформации или ее полном отсутствии. Керамические материалы имеют весьма высокий предел текучести, поэтому им не свойственна интенсивная пластическая деформация в кончике трещины. Даже если допустить наличие небольшого затупления трещины, напряжение в ее кончике превосходит теоретический предел прочности, происходит разрыв межатомных связей и трещина распространяется между двумя плоскостями атомов. Подобный хрупкий скол приводит к образованию атомно-плоской поверхности разрушения. Энергия разрыва атомных связей намного меньше энергии, поглощаемой при пластическом разрушении материала, поэтому стекло и многие керамические материалы столь хрупки.

Низкая вязкость разрушения делает керамику и жесткие полимеры весьма чувствительными к влиянию дефектов. Эти материалы склонны к хрупкому разрушению до наступления текучести. Многие из них обычно содержат огромное количество мелких дефектов. Кроме того, практически во всех хрупких материалах при их обработке или воздействии абразивной среды неизбежны поверхностные дефекты. Следовательно, прочность при растяжении хрупких материалов лимитируется их низкой вязкостью и дефектами.

Прочность хрупких материалов характеризуется значительным разбросом. Керамические материалы не имеют единого «предела прочности

при растяжении», однако имеется вероятность того, что образец имеет данную прочность. Отметим, что еще в 1920 г. было установлен эффект увеличения прочности на разрыв волокон стекла при их утончении. Так, для стеклянных волокон диаметром 2,5 мкм предел прочности на разрыв составляет 3500 МПа, в то время для обычного стекла он не превышает 100 МПа.

Кинетическое учение о природе прочности

До середины прошлого века считалось само собой разумеющимся, что внешняя растягивающая нагрузка распределяется по межатомным связям в твердом теле и при ее достаточной величине разъединяет атомы, что и ведет к разрушению твердого тела. Отсюда и возникло понятие предела прочности – критического внешнего напряжения, превышение которого вызывало резкую потерю целостности твердого тела.

Академик АН СССР Журков С. Н. внес существенный вклад в изучение физической природы механических свойств твердых тел, и прежде всего их прочности. Им было пересмотрено традиционное представление о существовании предела прочности как реальной физической характеристики. К такому сомнению его привели данные о том, что тела могут разрушаться и при меньших, чем предел прочности, нагрузках, но только не сразу, а через некоторое время. К тому же уже тогда был очевиден резкий (до стократного и более) разрыв между заложенными природой в твердые тела возможностями и низкими значениями прочности реальных материалов.

В созданном С. Н. Журковым кинетическом учении о природе прочности твердых тел ключевым выступает положение о том, что в классической области температур элементарными актами процессов, ведущих к разрушению твердого тела, являются разрывы напряженных межатомных связей локальными флуктуациями энергии.

До Журкова рассматривали главным образом зависимость предела прочности от времени действия нагрузки. При таком рассмотрении (время – аргумент, разрывная нагрузка – функция) физического объяснения закономерностей разрушения не было найдено. Журков утвердил «инверсию»: рассмотрение времени до разрушения тела в зависимости от приложенной нагрузки, которая и становилась разрывной [7]. Оказалось, что если производить измерения при ряде температур, то для каждой из них зависимости $\lg t$ от σ остаются линейными, но закономерно изменяются наклоны этих прямых [8]. Весьма существенно, что семейство линейных зависимо-

стей $\lg \tau$ — σ при разных температурах представляет собой пучок прямых, пересекающихся в одной точке — полюсе (рис. 16).

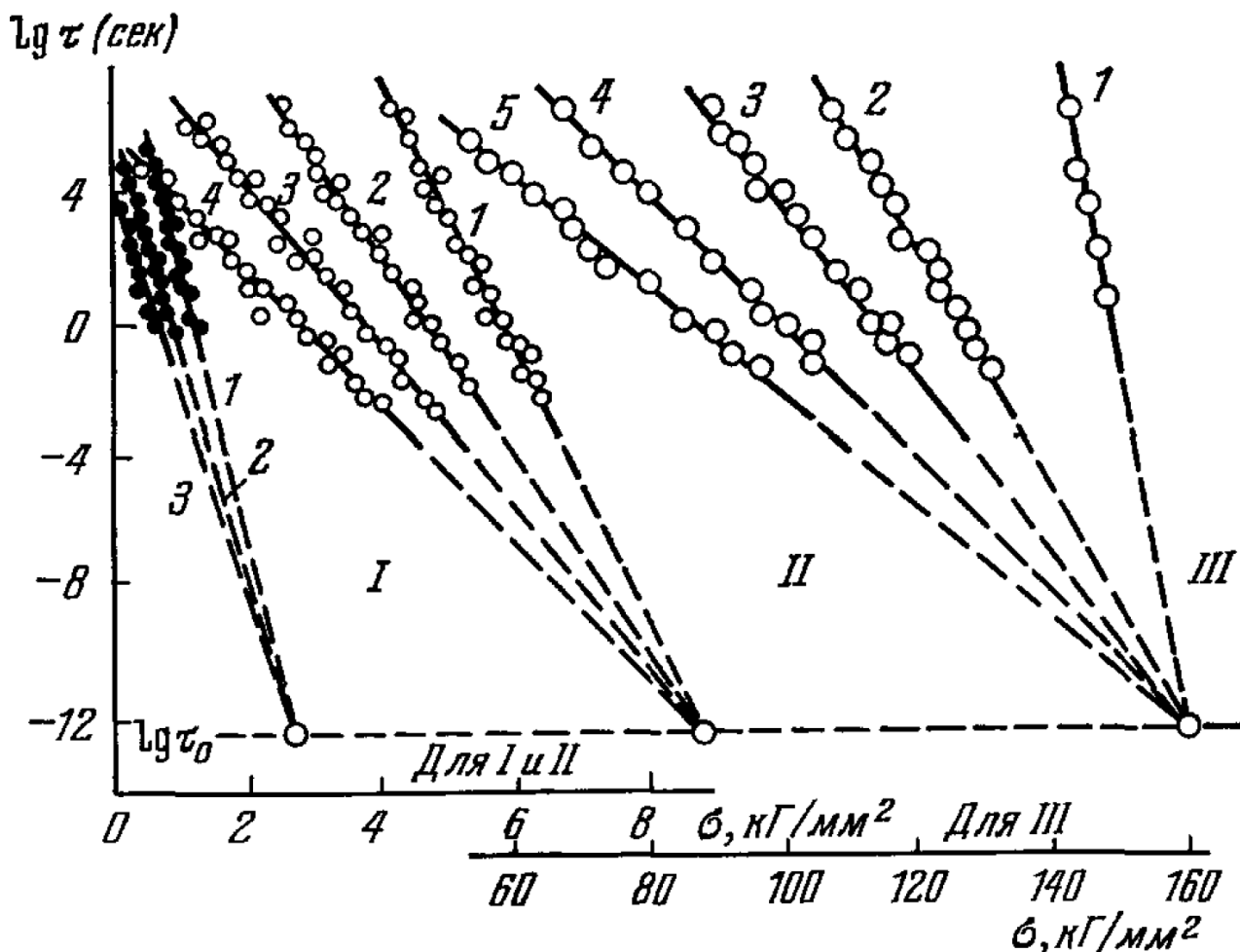


Рис. 16. Зависимость τ от напряжения при разных температурах [8]:
 каменная соль (I): 400 °C (1), 500 °C (2), 600 °C (3);
 Al (поликристаллический) (II): 18 °C (1), 100 °C (2), 200 °C (3), 300 °C (4);
 капрон (III): -180 °C (1), -120 °C (2), -75 °C (3), 20 °C (4), 80 °C (5).

Установлено, что для всех типов твердых тел этот полюс находится практически при одном и том же значении долговечности $\sim 10^{-13}$ с. Исследование экспериментальных зависимостей долговечности τ тел (времени между моментом нагружения и разрывом тела) в зависимости от приложенного напряжения σ и температуры T привело к выявлению закономерности, которая аналитически выражается следующим образом [8, 9]:

$$\tau(\sigma, T) = \tau_0 \exp\left(\frac{U(\sigma)}{kT}\right), \quad (4)$$

$$U(\sigma) = U_0 - qV_a\sigma,$$

где $\tau_0 \sim 10^{-13}$ с – долговечность в полюсе,

U_0 – энергия диссоциации вещества,

q – коэффициент локальных перенапряжений (достигает за счет дефектов в реальных телах значений 10–100 и выше, что и характеризует отличие экспериментальной величины прочности от теоретической),

V_a – активационный объем в элементарном акте диссоциации,

k – постоянная Больцмана.

Очень важным в кинетике разрушения является вопрос о переходе процесса разрушения с микроскопического на макроскопический. Журковым и его учениками было развито представление о двухстадийности разрушения гетерогенных тел, к которым принадлежит большинство керамических материалов. Было установлено, что на первой стадии идет рассеянное множественное накопление мелкомасштабных трещин, а на второй – образование крупномасштабных очагов разрушения за счет кластеризации первичных трещин. В работах В. Р. Регеля, А. И. Слущкера, В. С. Куксенко показано, что размеры начальных микротрещин обусловлены структурой материала, которая с одной стороны формирует локальные перенапряжения, с другой стороны ограничивает их рост на границах гетерогенности. Установлено, что скорость накопления трещин описывается выражением, аналогичным уравнению для долговечности (4) [8]. Это свидетельствует о том, что кинетика накопления микротрещин определяет долговечность нагруженного материала.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой физический смысл имеет модуль Юнга, какая у него размерность в системе СИ?
2. Сформулируйте закон Гука и укажите границы его применимости.
3. Каковы цели испытания материала на растяжение?
4. Что называется абсолютным удлинением и какова его размерность?
5. Какие деформации принято называть упругими, а какие – остаточными?
6. Какой вид имеет диаграмма растяжения для пластичного материала?

ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В этом эксперименте железная проволока и медная проволока растягиваются поворотом колеса. Эксперимент может выполняться с различными материалами. Удлинение ΔL измеряется датчиком вращательного движения. Растягивающая сила F измеряется с помощью датчика силы.

Цели эксперимента:

- запись диаграммы напряжение-деформация (диаграммы деформирования, а именно – растяжения) для медной или железной проволоки;
- определение модуля упругости по области пропорциональности.

Подготовка установки к эксперименту

Установка для проведения эксперимента показана на рисунке 17.

Для выполнения лабораторной работы по исследованию упругого и пластического удлинения металлической проволоки необходим следующий набор инструментов:

- медная или проволока, $\varnothing 0,20$ мм (1);
- датчик CASSY (2);
- программное обеспечение CASSY Lab (3);
- датчик силы (4);
- датчик вращательного движения (5);
- простой верстачный зажим (струбцина) – 2 шт. (6);
- мультизажим Leybold – 3 шт. (7);
- стендовый стержень (стержень стойки), 25 см – 2 шт. (8);
- стендовый стержень, 100 см (9);
- рулетка, 1 м / 1 мм (10);
- персональный компьютер с Windows 98/NT или выше.

Как правило, на рабочем месте система стержней находится в собранном состоянии. Проверьте правильность и комплектность сборки и, если необходимо, выполните соответствующие действия согласно следующему описанию.

Закрепите простые верстачные зажимы (6) на столе. Расстояние между зажимами должно быть около 95 см.

Закрепите стержни-стойки (25 см) в каждом простом верстачном зажиме таким образом, чтобы два мультизажима Leybold (7) могли быть закреплены на нем (рис. 17).

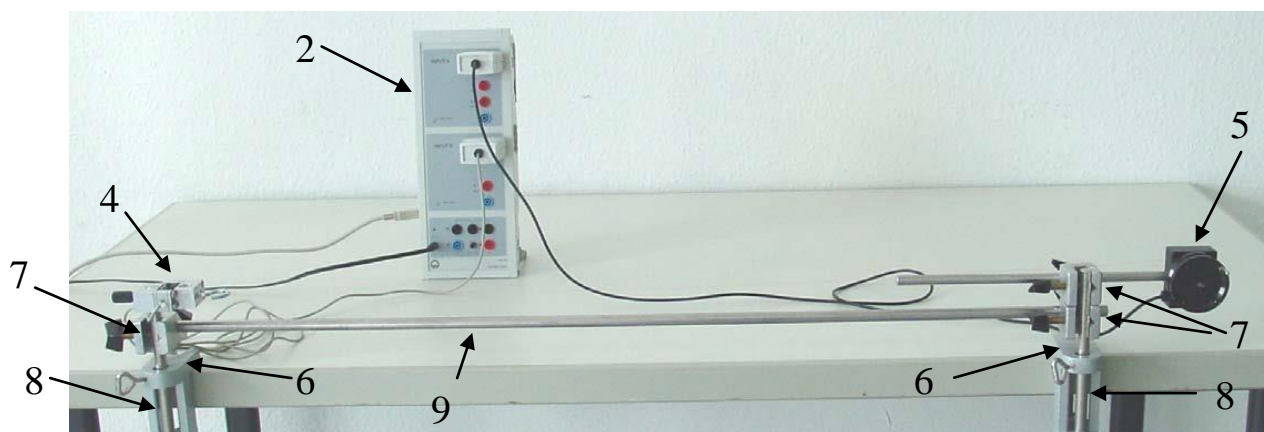


Рис. 17. Установка для проведения эксперимента и получения диаграммы напряжение-деформация медной и железной проволоки [1]

Закрепите стеновой стержень (100 см) (9) при помощи мультифункциональных зажимов Leybold (7) на каждом стержне-стойке (25 см) в струбцинах.

Закрепите датчик силы (4) с помощью мультизажима Leybold на левом конце стенового стержня (100 см) как показано рисунке 17.

Закрепите датчик вращательного движения (5) на противоположном конце стенового стержня напротив датчика силы как показано на рисунке 17.

Описание датчика CASSY


Разъёмы для подключения датчика CASSY к электросети, компьютеру и рабочей установке располагаются на лицевой и боковой поверхностях корпуса (рис. 18). Рядом с ними на боковых поверхностях блока располагаются световые индикаторы – красные и зеленые. Отсутствие индикации означает, что датчик не подключен к сети электропитания. При подключении датчика CASSY к сети электропитания засветятся все красные индикаторы. Красный цвет говорит о том, что данный канал не активен. При подключении канала цвет индикации меняется на зеленый.

Подготовка измерительной системы CASSY

Если не включен, включите сетевой фильтр.

Подключите датчик вращательного движения (5) ко входу «Input A» датчика CASSY (2).

Подключите датчик силы (4) к входу «Input B» датчика CASSY.

Если монитор еще не включен, нажмите кнопку пуска  на правом ребре монитора. Дождитесь, когда загрузится программное обеспечение (ПО) и на экране появится заставка (рис. 19).

При необходимости войти под учетной записью «Student».

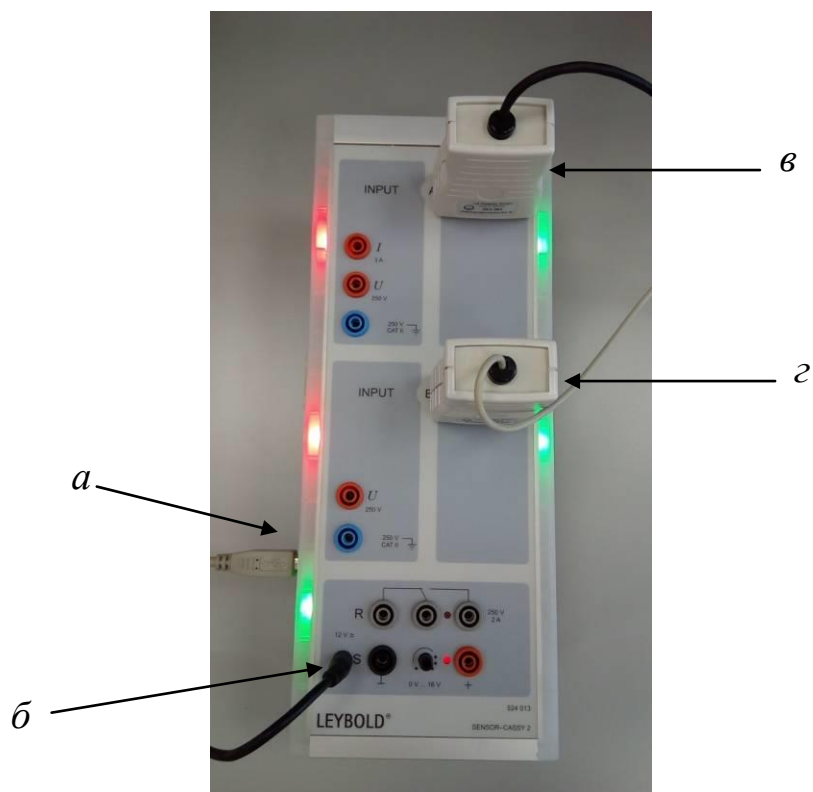


Рис. 18. Расположение разъемов на датчике CASSY: *a* – подключение к компьютеру (серый провод); *б* – подключение к сети электропитания (разъём 12 V, чёрный провод); *в* – вход «Input A»; *г* – вход «Input B»

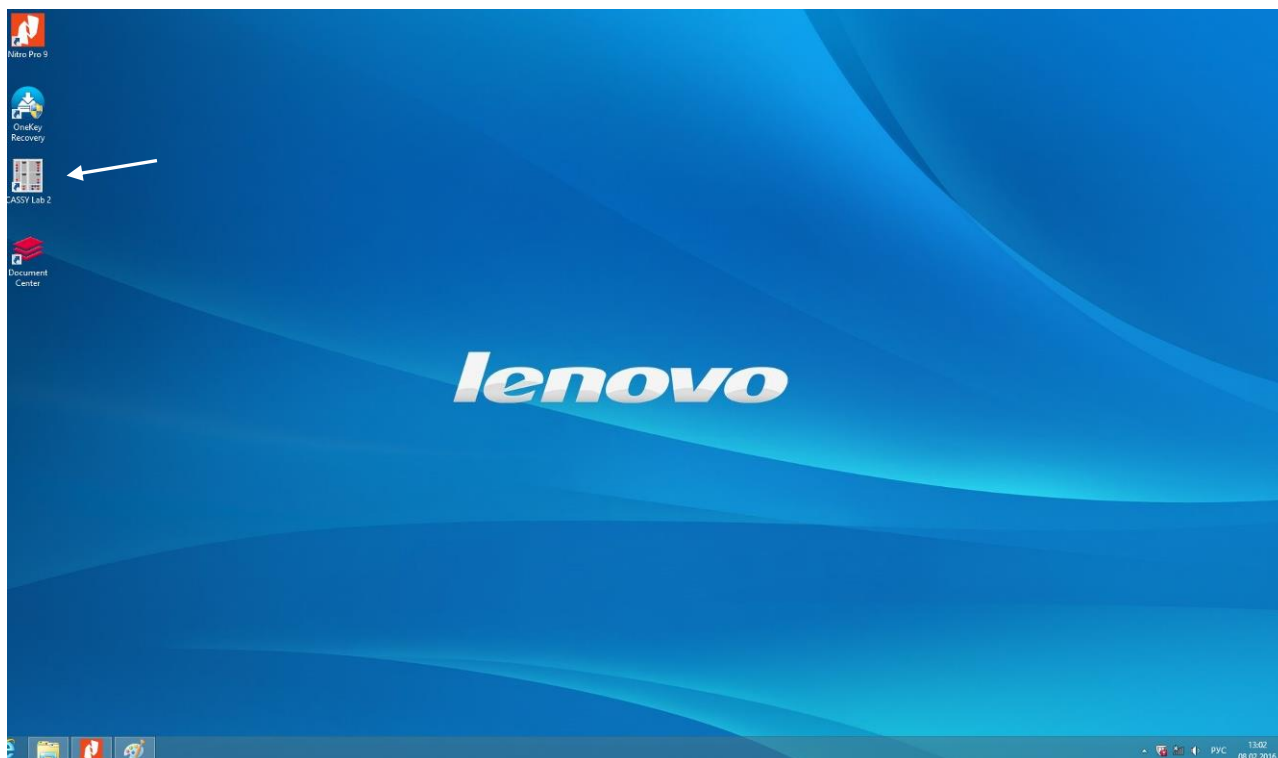


Рис. 19. Вид экрана монитора после загрузки ПО

Подключите датчик CASSY к сети электропитания. Подключите датчик CASSY через порт USB к компьютеру (разъем на задней стороне монитора).

Запустите с экрана ПО CASSY Lab2 (вид ярлыка указан стрелкой на рис. 19).

При правильном подключении датчиков они должны отображаться в окне «CASSY» (рис. 20).

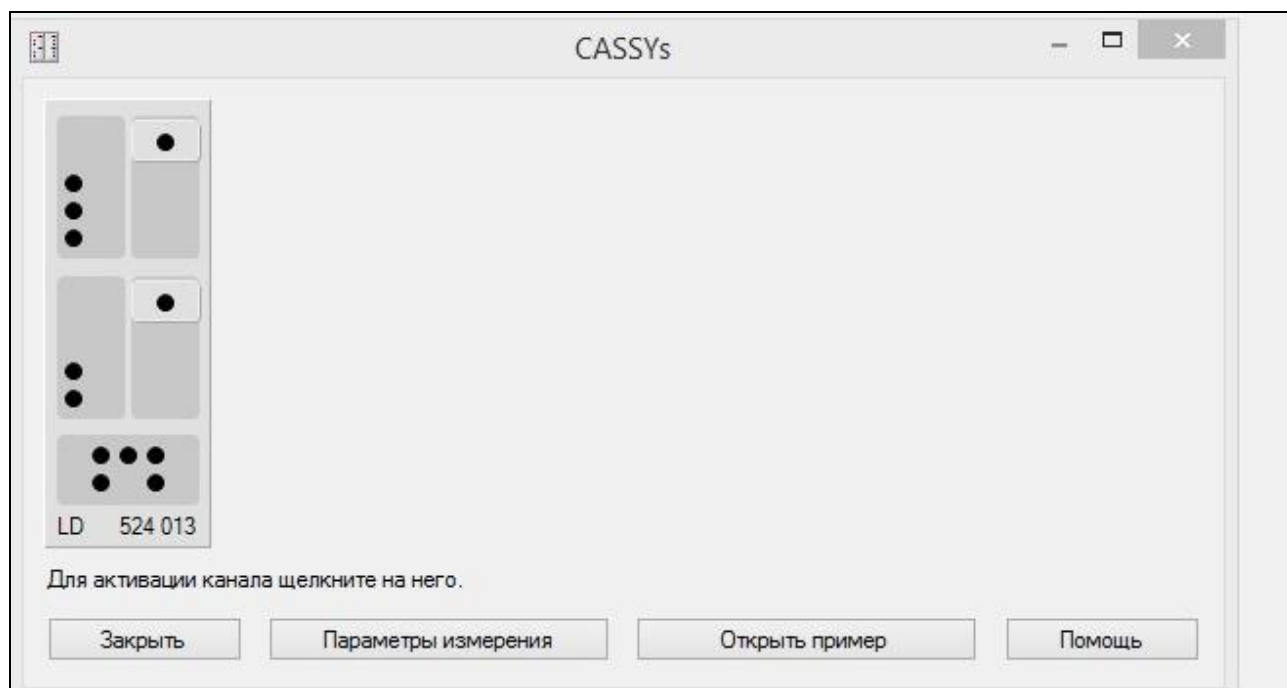



Рис. 20. Индикация подключения датчиков на экране

Активируйте каналы подключенных датчиков (вращательного движения и силы), нажав на их схематическое обозначение . При этом точка внутри овала должна окраситься в красный цвет.

Нажмите «Параметры измерения» (рис. 20). В правой части экрана в открывшемся окне установите измерительный интервал 500 мс.

Нажав правую кнопку мыши во всплывающем окне «Угол α_{A1} » (рис. 21, а) или одноименную кнопку в верхней строке меню правой панели, выберите «Перемещение S_{A1} (см)» (появится галочка рядом, рис. 21, б) и положение нуля «слева». При этом на экране отобразится окно установок для этого параметра.

Поверните колесо датчика вращательного движения по часовой стрелке, чтобы увидеть, нужно ли переключить направление с помощью кнопки «s \leftrightarrow -s». Если на шкале всплывающего окна «Перемещение S_{A1} »

происходит перемещение указателя в направлении от 0 до 15, то переключение не требуется.

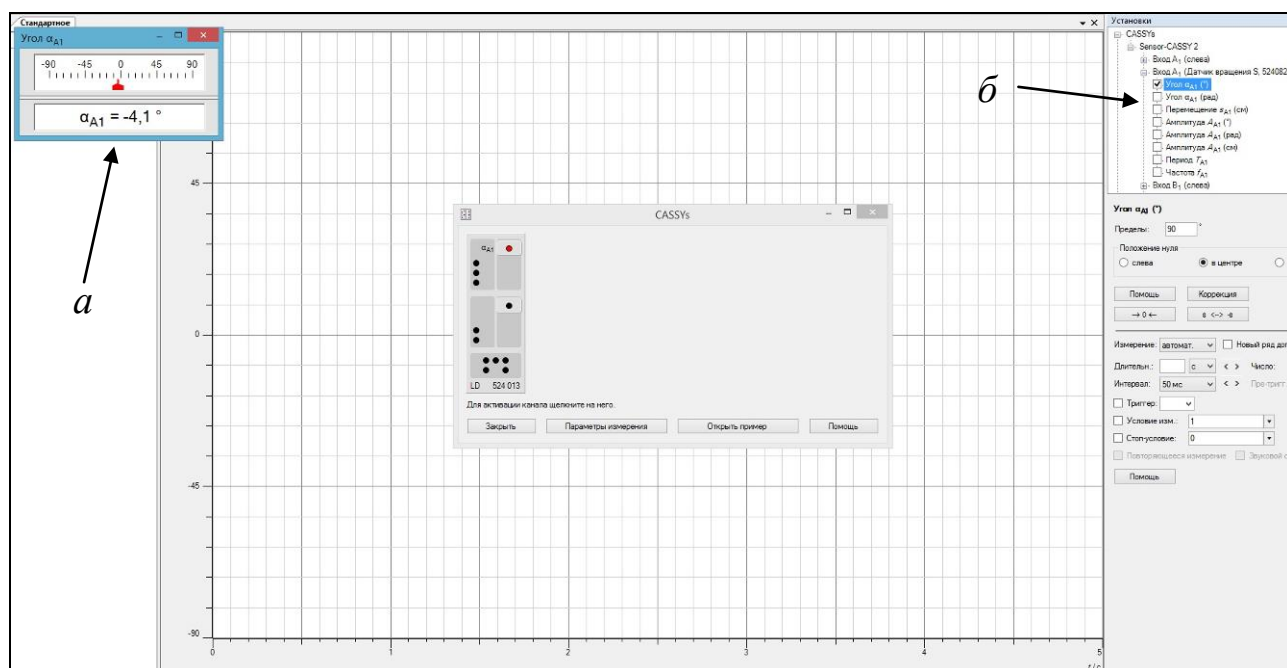


Рис. 21. Установка параметров измерения перемещения

Правой кнопкой мыши щелкните во всплывающем окне «Сила F_{B1} » (рис. 22, а) или соответствующую кнопку в верхней строке меню (рис. 22, б). Выберите предел измерений «-15Н .. 15Н» (рис. 22, в); измерение значений – «Усредненные» (рис. 22, г), положение нуля – «слева» (рис. 22, д).

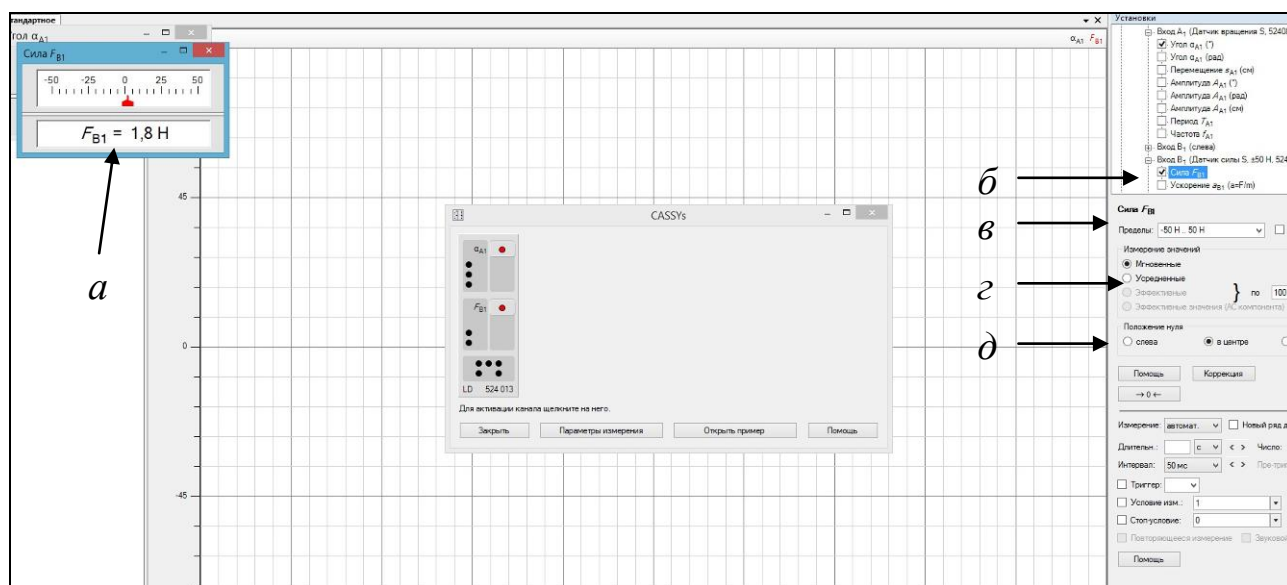


Рис. 22. Установка параметров измерения «Сила F_{B1} »

Щелкните правой кнопкой по основному экрану (координатная сетка), чтобы переобозначить оси (указано стрелкой на рис. 23). В правом окне установок установите « S_{A1} » по оси X и « F_{B1} » по оси Y (рис. 24).

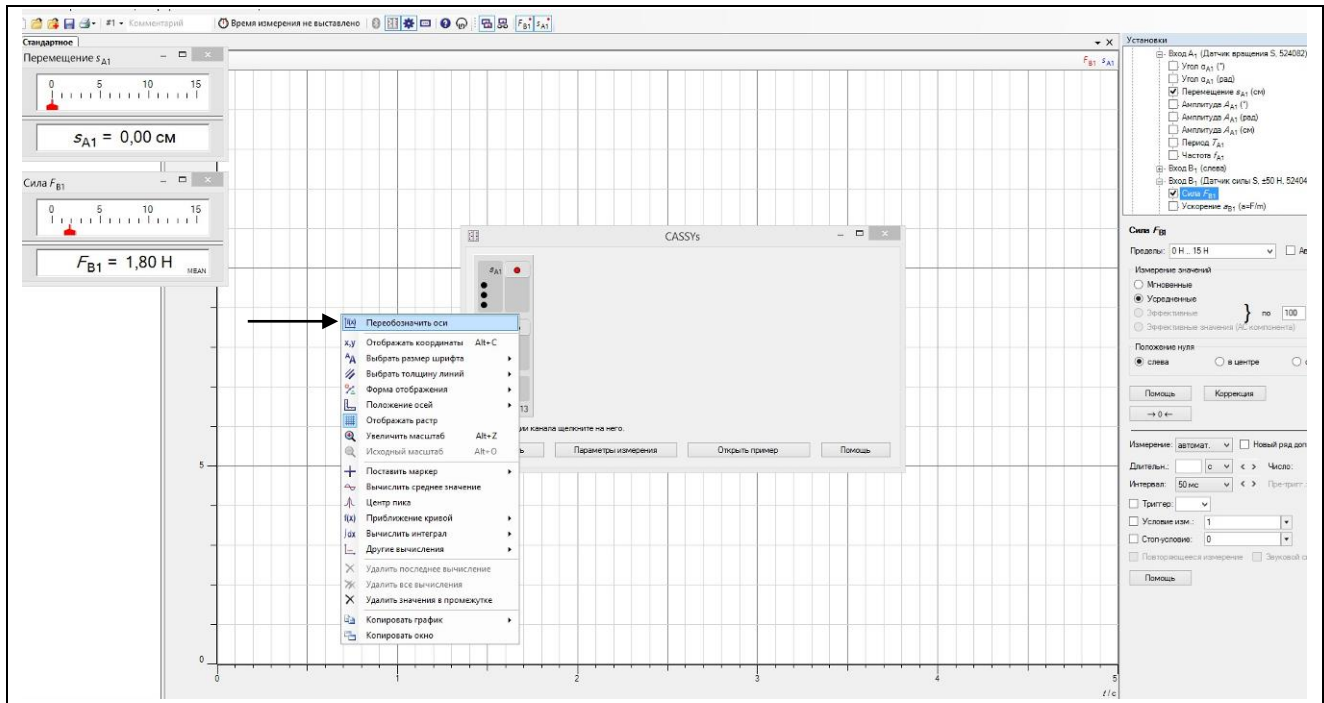


Рис. 23. Переобозначение осей

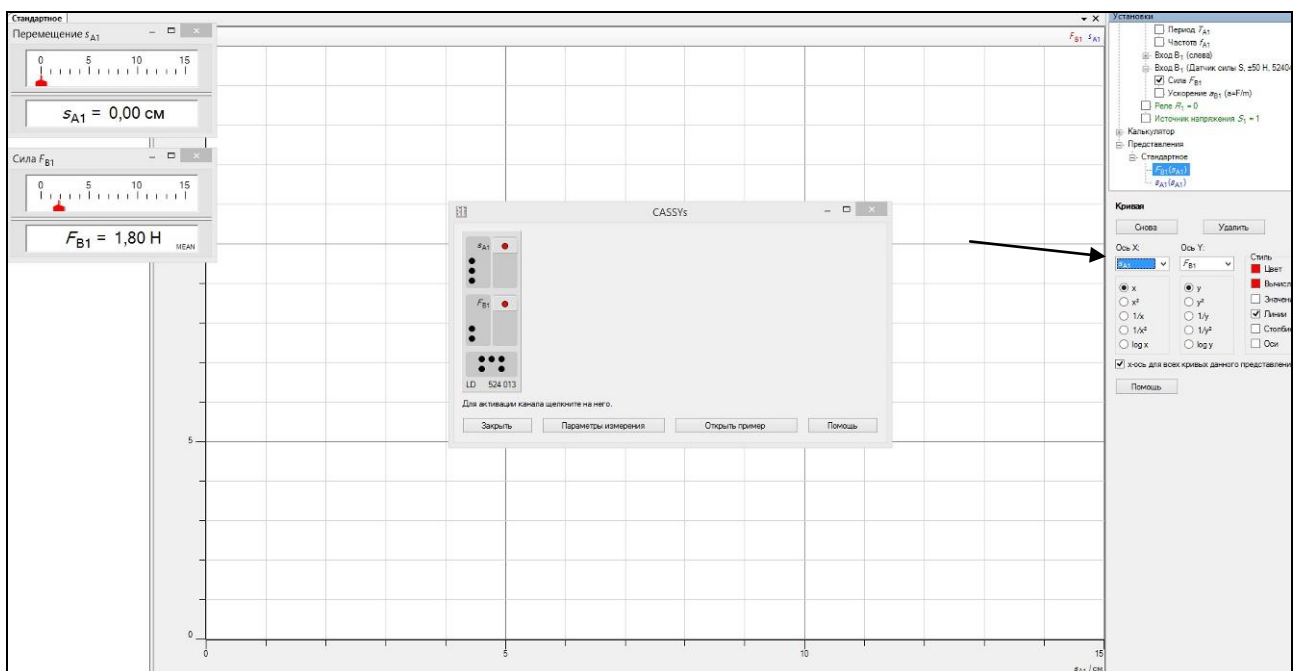


Рис. 24. Установка осей

Выполнение эксперимента

Отрежьте кусок проволоки (1) длиной приблизительно 110 см.

Важно: Проволоку нельзя изгибать ни в какой точке!

Закрепите проволоку на крючке датчика силы (4), как показано на рисунке 25.

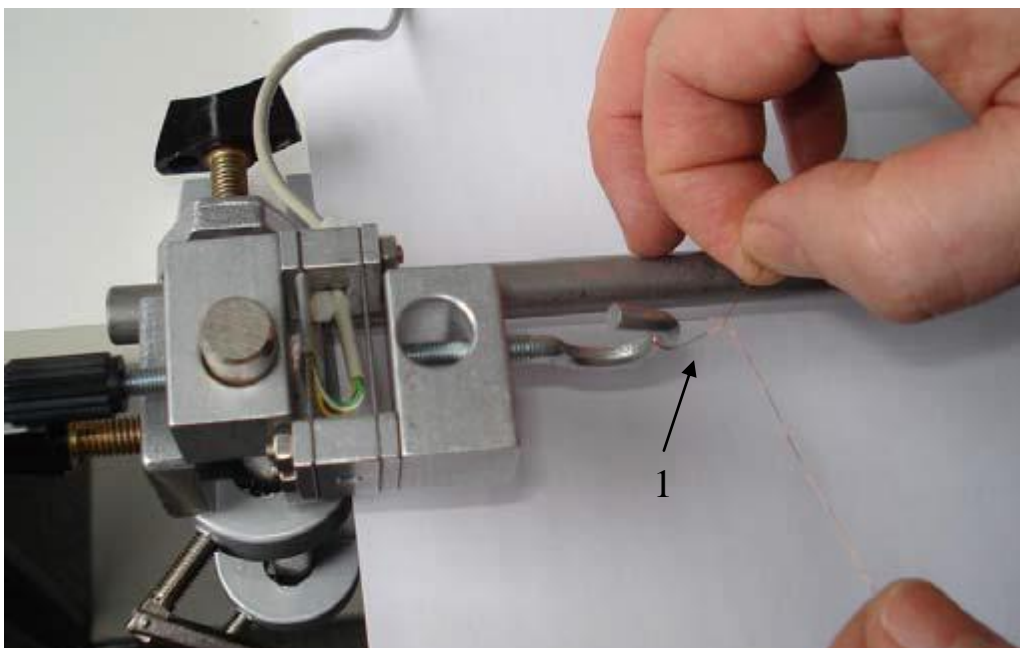



Рис. 25. Закрепление проволоки на датчике силы [1]

Закрепите другой конец проволоки на колесе датчика вращательного движения, используя штекер 4 мм (рис. 26).

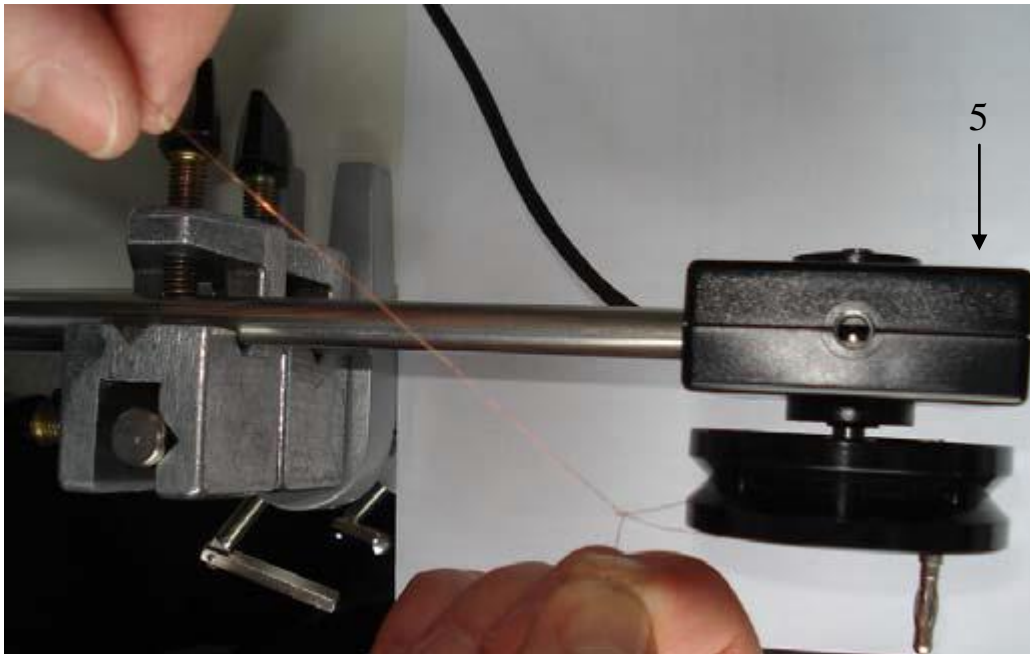
Важно: После того, как вы зафиксировали проволоку на колесе датчика вращательного движения, колесо не должно быть свободным, т. е. необходимо придерживать (зафиксировать) колесо, оставляя проволоку в натянутом (без растягивающего усилия) состоянии.

Нажмите правую кнопку мыши в окне «Сила F_{B1} ». Если в данном окне стрелка указателя отклонена от положения «0», нажмите кнопку « $\rightarrow 0 \leftarrow$ » (указано стрелкой на рис. 27) (при необходимости повторить).

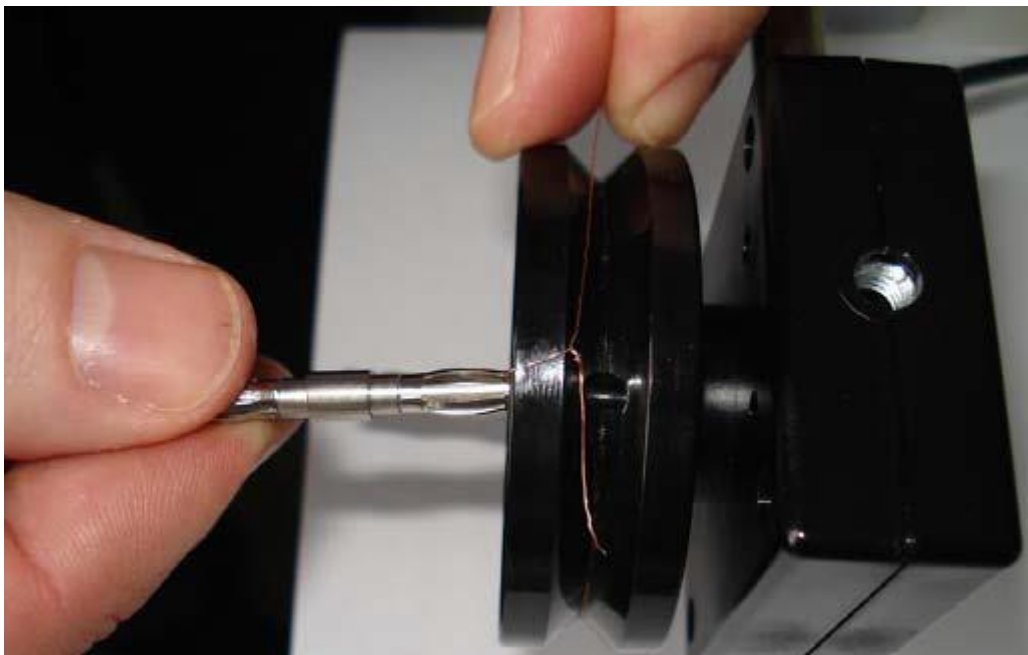
Щелкните правой кнопкой мыши в окне «Перемещение S_{A1} ». Если в данном окне стрелка указателя отклонена от положения «0», нажмите кнопку « $\rightarrow 0 \leftarrow$ » (при необходимости повторить) (рис. 28).

Начните измерения нажатием кнопки запуска/остановки записи данных  или функциональной клавиши F9, чтобы начать запись.

Медленно поворачивайте колесо для создания напряжения до тех пор, пока проволока не порвется.



a



б

Рис. 26. Закрепление проволоки на датчике вращательного движения:
привязать медную проволоку к отверстию колеса (*a*),
зафиксировать проволоку с помощью щипселя в отверстии (*б*) [1]

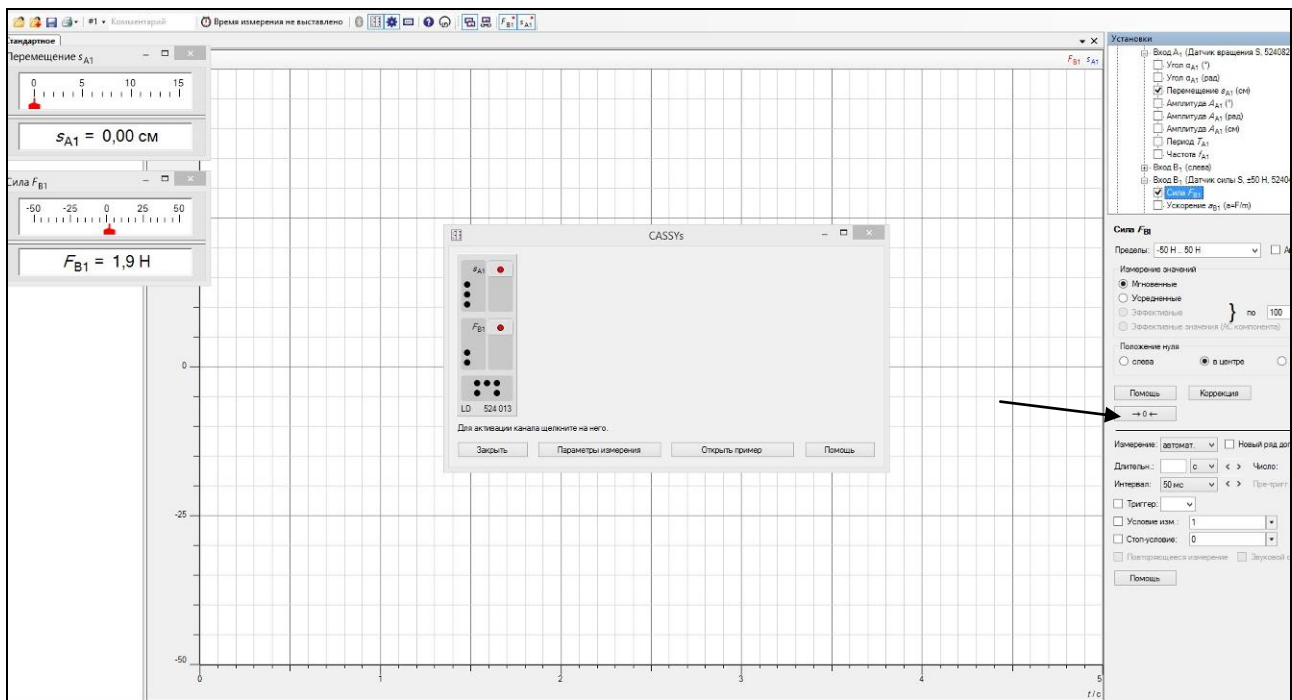


Рис. 27. Обнуление значения силы

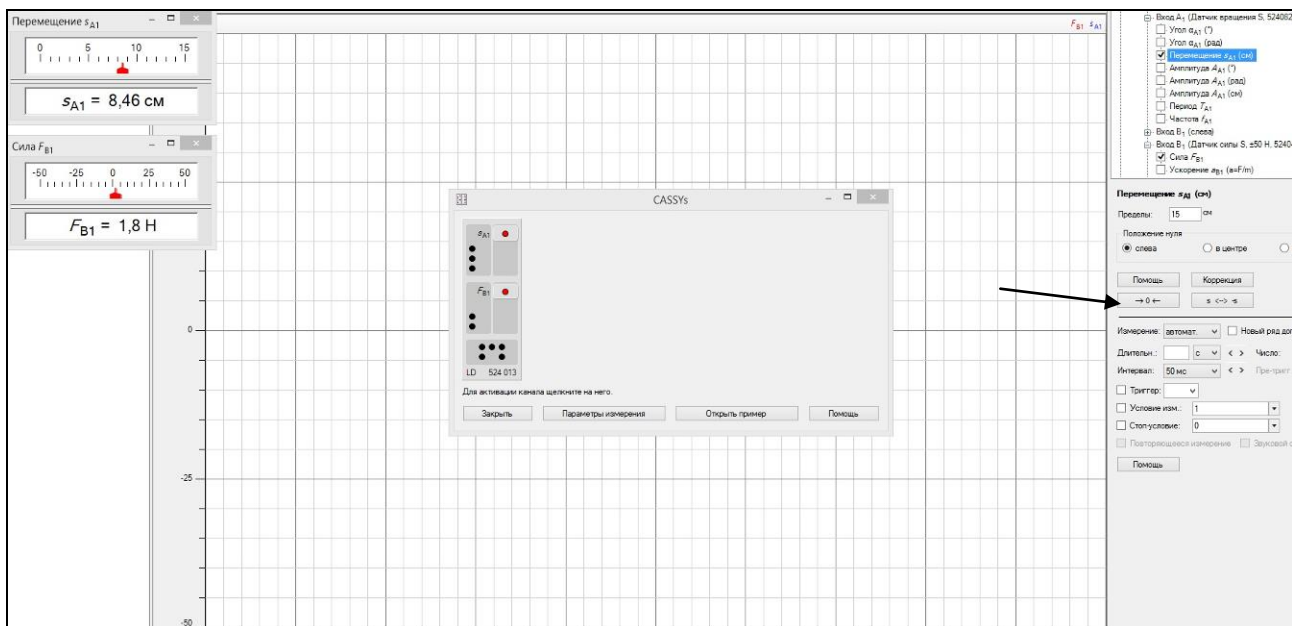



Рис. 28. Обнуление значения перемещения

При повороте колеса, глядя на экран, можно устанавливать подходящую скоростью регистрации данных. Когда проволока порвётся, остановите запись данных, нажав кнопку . Повторите измерения для проволоки из другого материала. Вид диаграмм растяжения исследуемых проволок приведен на рисунке 29.

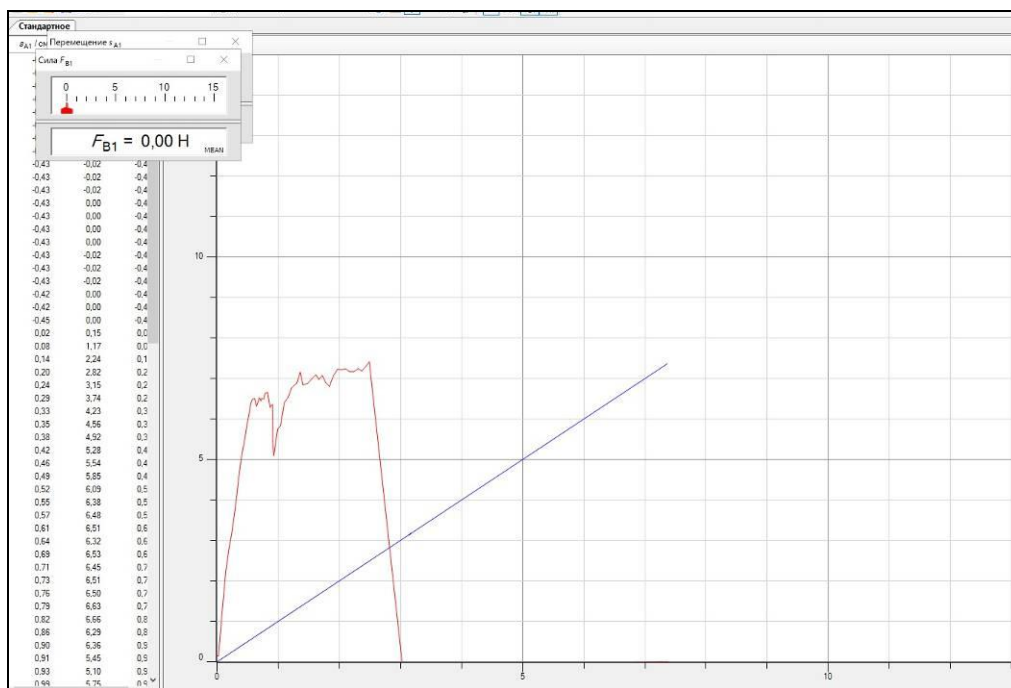


Рис. 29. Диаграмма растяжения для железной проволоки

Обработка результатов

Чтобы определить модуль упругости из уравнения (3), нужно оценить удлинение ϵ и напряжение σ и построить диаграмму. Далее дается пошаговая инструкция для определения и построения необходимых величин.

Определение удлинения ϵ

Если окно установок «Параметры измерения» не открыто, нажмите функциональную клавишу F5 и выберите в «Установках» путь «Калькулятор/Формула» (рис. 30, а, б). Щелкните кнопку «Снова», задающую новую величину «Новая переменная», чтобы задать формулу расчета удлинения ϵ . В строке «Имя» (рис. 30, в) введите название переменной «Удлинение».

Для того, чтобы в обозначении отображался символ ϵ , необходимо в поле «Символ» ввести комбинацию «&e».

Так как относительное удлинение $\Delta L/L$ не имеет размерности, оставьте поле единиц измерения пустым.

Введите значения для диапазона от «0» до «0,15» и выберите значение 4 для количества знаков после запятой (Дес. разряды).

Введите путем ручного набора формулу (1), приведенную к фиксированной длине $L = 1,01$ м):

$$sA1*0.01/1.01.$$

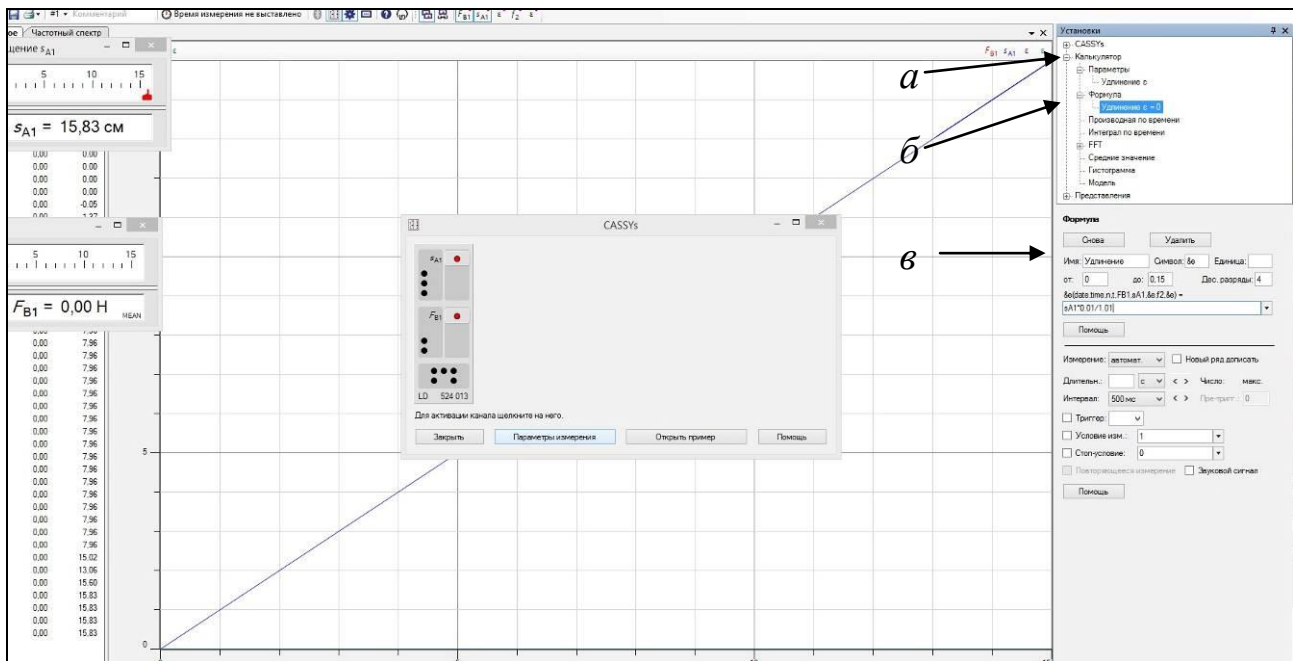


Рис. 30. Определение новой переменной

Определение напряжения σ

Для определения напряжения σ повторите действия, аналогичные предыдущему пункту.

В строке «Имя» введите название переменной «Напряжение». Введите «&s», чтобы определить символ σ .

Введите единицу измерения Н/м^2 «Н/м²».

Введите значения для диапазона от «0» до «0,0035» и выберите значение 4 для количества знаков после запятой (Дес. разряды).

Введите путем ручного набора выражение, приводящее уравнение (2) к площади сечения $S = \pi r^2$):

$$FB1/(3,1416*(0,0002/2)^2)*10^{(-11)}.$$

Построение графика напряжения σ как функции удлинения ϵ

Чтобы получить график напряжения σ как функции удлинения ϵ , действуйте следующим образом.

Нажмите функциональную клавишу F5 и выберите в Установках «Представление» (рис. 31, а), «Снова» (рис. 31, б). Далее последовательно выполняете: в поле «Имя» (рис. 31, в) введите название, т. е. «Диаграмма деформирования», Тип – Прямоугольные координаты, «Добавить новую кривую» (рис. 31, г).

Выберите « ϵ » по оси X и « σ » по оси Y (рис. 32).

Закройте окно «Установки» и выберите вкладку «Диаграмма деформирования».



Рис. 31. Подготовка отображения диаграммы деформирования

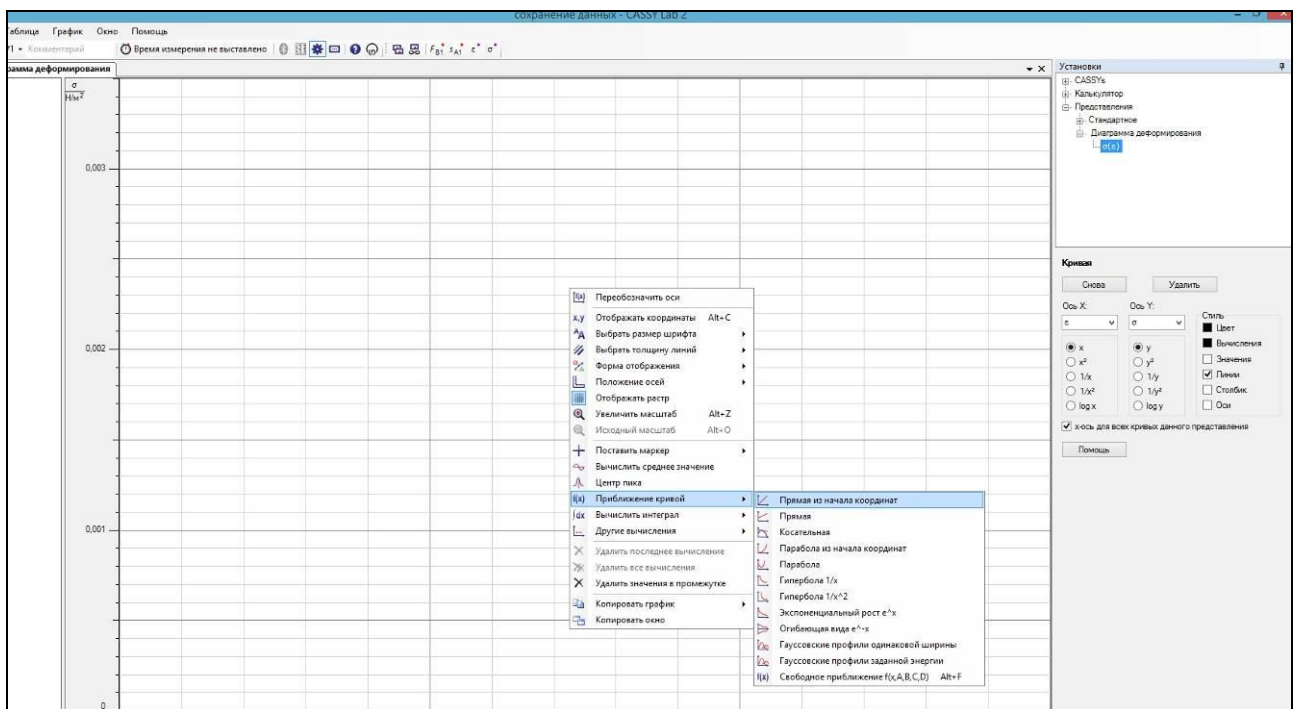


Рис. 32. Определение осей для построения диаграммы деформирования

Оценка данных

Щелкните правой кнопкой мыши по координатной сетке. Во всплывающем окне выберите путь «Приближение кривой / Прямая из начала координат» (рис. 32).

Выберите данные для подгонки. Для этого выполните двойной щелчок левой клавишей компьютерной мыши в области окончания участка

пропорционального роста и, *удерживая нажатой левую кнопку мыши*, двигайте курсор вдоль кривой деформации в сторону начала координат. Отпустите клавишу в начале измеренной кривой. *Выбранные данные будут окрашиваться в голубой цвет*. На графике появится аппроксимирующая прямая из начала координат (рис. 33).

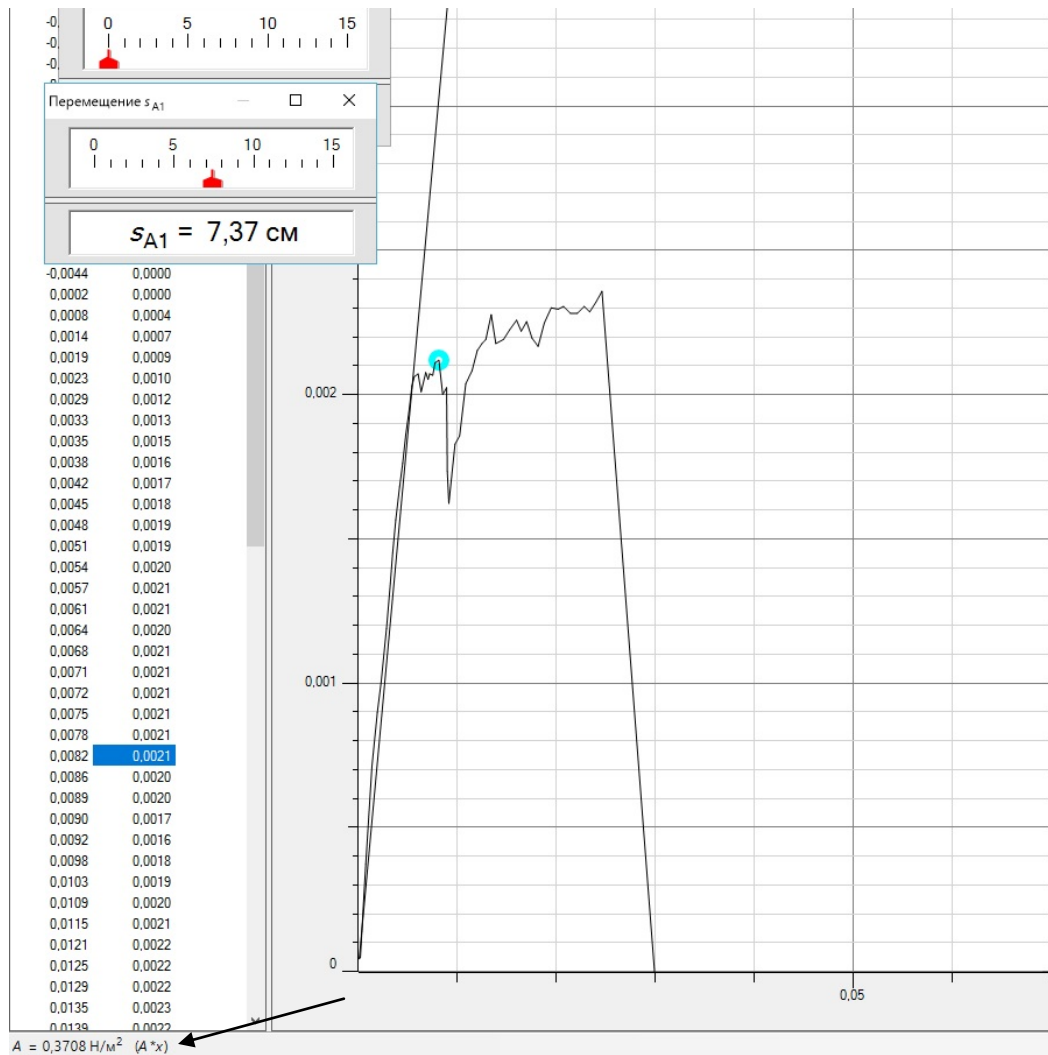


Рис. 33. Вид диаграммы растяжения для металлической проволоки. Прямая линия аппроксимирует линейный участок

Результаты оценки отображаются в строке состояния в нижней части окна (рис. 33), где A – величина, пропорциональная тангенсу угла наклона проведенной касательной.

Значение модуля упругости находится по формуле

$$E = A \cdot 10^{-11} \text{ Н/м}^2. \quad (4)$$

Для вывода результата на экран нужно использовать сочетание клавиш Alt+Г. В открывшемся окне выйдет текст, отвечающий отображению значения A в строке состояния. Преобразуйте текст таким образом,

чтобы отображалась надпись вида (4), где вместо A стоит соответствующее численное значение.

Нажатием на верхней панели инструментов стандартной кнопки «Сохранить» сохраните полученные данные измерений и оценки значений модуля упругости по следующему адресу: Рабочий стол / Для студентов / Фамилия, где укажете свою фамилию (при наличии однофамильцев добавьте другие отличительные символы).

Приведите установку к первоначальному состоянию. Для этого произведите следующие действия.

В окне «Установки» деактивируйте каналы подключенных датчиков (Вход A_1 , Вход B_1), «отжав» галочки в активированных позициях. При этом точка внутри овала должна окраситься в черный цвет.

Закройте окно ПО CASSY Lab2.

Отключите датчик CASSY от порта USB компьютера.

Отключите датчик CASSY от сети (разъём 12 V, чёрный провод).

Содержание отчета

Отчетом по работе является демонстрация данных сохраненного файла измерений и оценки модуля упругости (рис. 34).

Чтобы создать график с различными измерениями, различные файлы измерений загружаются в существующий файл измерения.

Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы. Привести значения измеряемых величин, взятые из справочных изданий.

Пример измерения напряжения как функции удлинения для железной и медной проволок показан на рис. 34. Подгонка прямой линией, проходящей через начало координат, даёт модуль упругости:

$$E_{\text{Fe}} = 1,55 \cdot 10^{-11} \text{ (Н/м}^2\text{)},$$

$$E_{\text{Cu}} = 4,13 \cdot 10^{-10} \text{ (Н/м}^2\text{)}.$$

Измерения показывают, что удлинение проволоки подчиняется закону Гука, т.е. для малых растягивающих сил деформации упругие (индикатор датчика силы делает возвращение к нулю при отпускании колеса датчика поворотного движения). За пределом упругости деформации становятся необратимыми (индикатор датчика силы не возвращается к нулю). Проволока начинает растягиваться. Дальнейшее увеличение приводит к разрыву.

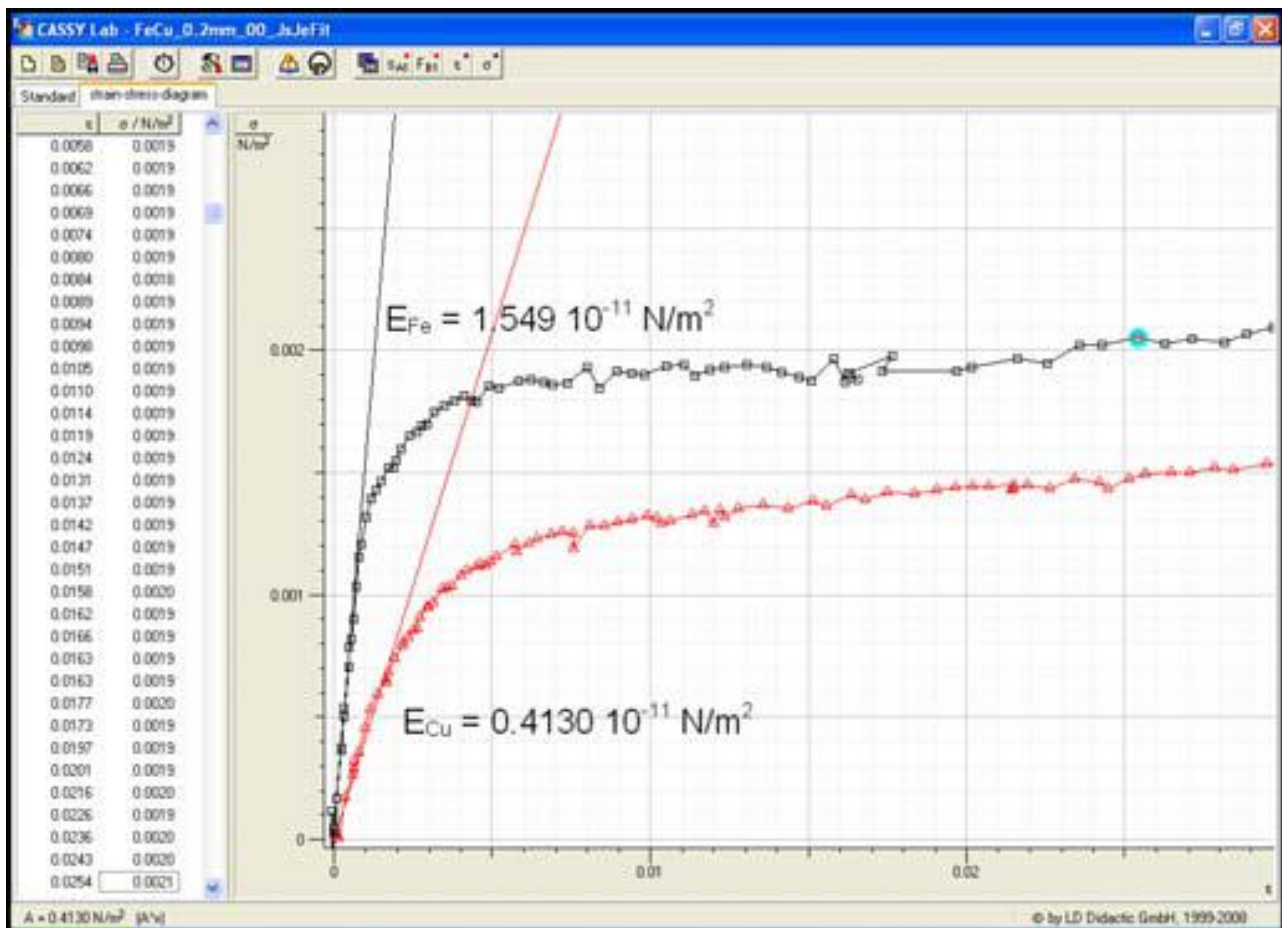


Рис. 34. Пример вида отчета о проделанной лабораторной работе

СЛОВАРЬ

Журков, Серафим Николаевич (1905–1997) – советский физик, академик АН СССР. Специалист в области физики прочности (экспериментальное достижение теоретической прочности материалов, выяснение атомно-молекулярного механизма разрушения твердых тел). Обосновал справедливость предположения, что локальные дефекты являются причиной низкой практической прочности и др.

Коттон, Франк Альберт (1930–2007) – американский учёный, иностранный член РАН. Специалист в области химии неорганических и металлоорганических соединений, ферментативной химии [10]

Лоренц, Хендрик Антон (1853–1928) – нидерландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике 1902 г. (совместно с Питером Зееманом) «за выдающиеся заслуги в исследованиях влияния магнетизма на радиационные явления» [10]

Постоянная Больцмана – k , физическая постоянная, определяющая связь между температурой и энергией [10]. Её экспериментальное значение в Международной системе единиц (СИ) равно

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Струбцина – приспособление с зажимным механизмом для фиксации деталей при обработке или склеивании двух элементов изделия. С ее помощью предмет закрепляется в неподвижном положении, что облегчает работу мастера и позволяет достичь качественного результата.

Электрическая постоянная – абсолютное значение диэлектрической проницаемости вакуума. Численное значение величины ϵ_0 и ее размерность зависят от выбора системы единиц. В системе СГСЭ $\epsilon_0 = 1$; в системе СИ

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{В} \cdot \text{м}) = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Уравнение Вульфа-Брэггов – уравнение, связывающее угол θ между первичным и отраженным от кристалла рентгеновским лучом с длиной волны λ и межплоскостным расстоянием d :

$$2d\sin\theta = n\lambda.$$

В случае исследования кристаллов по методу Дебая-Шеррера (порошковым методом) типичная рентгенограмма кристалла представ-

ляет собой распределение дифракционных максимумов – рефлексов (дифрактограмму), где по горизонтали отложены значения угла поворота счетчика 2θ , а по вертикали – интенсивность отражений (число импульсов в секунду). Положение каждого максимума на дебаеграмме отвечает наличию отражения. Из этой рентгенограммы можно определить координаты максимумов, т. е. углы 2θ , а по ним с помощью уравнения Вульфа–Брэггов вычислить межплоскостные расстояния d [11, 12]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Investigating the elastic and plastic extension of metal wires – Recording and evaluating with CASSY. Experiment Instructions [Электронный ресурс] // URL: http://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P7/P7142_e.pdf?_ga=1.64141295.1597494659.1466671793.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 1. Механика [Электронный ресурс]: учебное пособие. СПб.: Лань, 2011. – 337 с. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=704. – Загл. с экрана.
3. Байков Ю. А. Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс]: учебное пособие. М.: «Лаборатория знаний» (ранее «БИНОМ. Лаборатория знаний»), 2013. 294 с. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=56908 – Загл. с экрана.
4. Кутрунова З. С. Испытание материалов. Растяжение стального образца с измерением упругих деформаций [Электронный ресурс]: метод. указ. к лабор. работе. Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ». 2014. 19 с. URL: http://www.tgasu.ru/content/method/post-3348/files/laboratomaya_rabota_ispytanie_stalnogo_obrazca_na_rastyazhenie.pdf.
5. Юскаев В. Б. Композиционные материалы [Электронный ресурс]. Сумы: СумГУ, 2006. 179 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/1929/3/Компmat.pdf>.
6. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Электронный ресурс]. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 80 с. URL: http://www.ph4s.ru/book_razrushenie.html.
7. Слуцкер А. И. Формула Журкова [Электронный ресурс] // XV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.: сборник тезисов. 12–14 апреля 2005. СПб. С. 3–4. URL: http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/Chteniya_2005.pdf.
8. Стерлюхин А. И., Федоров В. А. Путь к разгадке кинетической прочности твердых тел (Серафим Николаевич Журков, 1905–1997) / Вестник ТГУ. 2013. Т. 18, № 4. С. 1631–1633.
9. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел [Электронный ресурс] // Успехи физических наук. 2013. Т. 106, № 2. С. 193–228. URL: http://ufn.ru/ufn72/ufn72_2/Russian/r722a.pdf.
10. Сайт «Википедия – Свободная энциклопедия» [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org>.

11. Васильев А. Д. Структурные исследования [Электронный ресурс]: курс лекций / Красноярск: ИПК СФУ, 2009. (Структурные исследования: УМКД № 1398-2008 / рук. творч. коллектива А. Д. Васильев). – 1 электрон. опт. диск (DVD). Систем. требования : Intel Pentium (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 50 Мб свободного дискового пространства; привод DVD; операционная система Microsoft Windows XP SP 2 / Vista (32 бит); Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf).

12. Храмов А. С., Назипов Р. А. Рентгеноструктурный анализ поликристаллов. Ч. I (Элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам) [Электронный ресурс]: Учеб.-методическое пособие для студентов физического факультета. Изд. 2-е, исправл. и доп. Казань: КГУ, 2009. 64 с.: ил. 14, табл. 4. URL:
http://kpfu.ru/docs/F1718491023/12_rsa1_2_2.pdf.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЖЕСТКОСТИ	7
УПАКОВКА АТОМОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ	9
ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	12
Модуль упругости.....	12
Диаграмма деформирования.....	14
Механизмы пластической деформации.....	16
Вязкость разрушения.....	19
Прочность хрупких материалов.....	20
Кинетическое учение о природе прочности.....	21
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	23
ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	24
Подготовка установки к эксперименту.....	24
Описание датчика CASSY.....	25
Подготовка измерительной системы CASSY	25
Выполнение эксперимента.....	30
Обработка результатов.....	33
Содержание отчета.....	37
СЛОВАРЬ.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	41

Учебное издание

Болтакова Наталья Викторовна,
Салахов Альмир Максумович

УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
Учебно-методическое пособие к лабораторным работам

РЕЦЕНЗИЯ

на учебно-методическое пособие «Упругая и пластическая деформация», подготовленное на кафедре физики твердого тела Института физики авторов Болтаковой Н. В., Салахова А. М.

При выборе материала для изготовления любого изделия важно его поведение в процессе эксплуатации. Одним из определяющих факторов является степень деформации тела при приложении к нему нагрузки, способность восстанавливаться после снятия приложенного напряжения.

Структура методического пособия построена на последовательном знакомстве обучающихся с типовыми случаями поведения материалов при растяжении, объяснении природы упругих свойств, и, наконец, описании лабораторной установки с подробным указанием последовательности действий при выполнении работы.

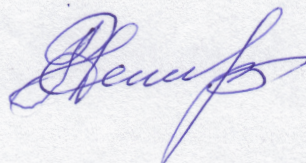
Практическую значимость для обучающихся имеет уяснение причин и механизмов возникновения деформаций.

Достоинством данного пособия является обзор хоть и не всегда подробного, но достаточного количества информации по основным понятиям, связанным с упругими и неупругими свойствами тел. При необходимости обучающийся сам сможет найти более подробную информацию, опираясь на предложенный минимум теоретического материала.

Ввиду бурно развивающейся промышленности полимеров, целесообразно было бы более подробно описать упругие свойства таких материалов.

В целом, указанные замечания не являются причиной, препятствующей опубликованию данного пособия и применению его в учебном процессе.

Канд. физ.-мат. наук,
доц. каф. теоретической физики



Р.Г. Деминов