

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
Брестский государственный технический университет

Кафедра прикладной механики

# **СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

для студентов специальностей  
машиностроительного и строительного профиля

**Часть I**

Брест 2020

При изучении сопротивления материалов чрезвычайно важную роль играет эксперимент, который дает возможность получить механические характеристики материалов, необходимые для построения теории расчетов на прочность. С помощью эксперимента производится проверка теоретических выводов и формул. Обычно эти выводы и формулы получаются на основании допущений (гипотез), а поэтому требуют проверки на опыте.

Основная цель лабораторного практикума – оказать помощь студентам при самостоятельной подготовке к лабораторным работам.

Часть 1. Издается в 2-х частях.

Составители: С. Р. Онысько, ст. преподаватель

И. Г. Томашев, ст. преподаватель

А. И. Веремейчик, доцент

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
Техника безопасности.....	2
Измерительные приборы.....	3
<b>Лабораторные занятия</b>	
<b>Часть 1. Определение физических и механических характеристик материалов</b>	
Работа № 1 – Испытание стального образца на растяжение.....	8
Работа № 2 – Определение модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации.....	14
Работа № 3 – Испытание материалов на сжатие.....	17
Работа № 4 – Испытание материалов на срез и скалывание.....	23
Работа № 5 – Испытание круглого стального стержня на кручение и винтовых цилиндрических пружин.....	26
Работа № 6 – Определение коэффициента концентрации напряжений поляризационно-оптическим методом.....	29
Работа № 7 – Определение ударной вязкости материалов.....	31

## ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление материалов – это инженерная наука о прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций, механизмов и машин. Все конструкции выполняются из реальных материалов, каждый из которых обладает присущими ему физико-механическими свойствами. Механические характеристики материалов – числовые значения, характеризующие прочность, жесткость, пластичность, упругость, вязкость и другие свойства. Они определяются на основе результатов испытаний образцов.

Программой курсов «Сопротивление материалов» и «Механика материалов» предусматривается параллельное изучение теоретического материала и выполнение ряда лабораторных работ. Часть этих работ связана с изучением механических свойств материалов для выполнения расчётов на прочность, жесткость и устойчивость. Другая часть посвящена опытной проверке расчетных формул, полученных теоретическим путем.

Важным вопросом является проверка основного закона сопротивления материалов – закона Гука для различных материалов. Кроме того, на лабораторных занятиях студент знакомится с методикой и техникой проведения испытаний образцов и конструктивных элементов, с измерительными приборами и испытательными машинами. Завершением лабораторных работ является отчет, выполненный студентом по установленной форме, с последующей защитой.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В лаборатории кафедры прикладной механики размещено сложное оборудование с высоким электрическим напряжением, опасным для жизни человека, а также ряд напольных и настольных установок с относительно тяжелыми грузами, которые могут привести к травме.

С целью предупреждения несчастных случаев студенты обязаны соблюдать следующие основные правила:

- 1) выполнять требования преподавателя и учебного персонала лаборатории о соблюдении правил техники безопасности;
- 2) приступать к выполнению лабораторной работы только после разрешения преподавателя или учебного персонала лаборатории;
- 3) запрещается самовольно приводить в действие машины, механизмы, нагружать установки;
- 4) при выполнении работы не отвлекаться на посторонние действия;
- 5) при обнаружении неисправности немедленно заявить об этом преподавателю или учебному персоналу лаборатории;
- 6) запрещается трогать приборы, установки и испытательные машины, на которых не выполняется данная лабораторная работа;
- 7) к лабораторным работам допускаются студенты, ознакомленные с данными требованиями под личную подпись.

В лабораторных работах используются точные высокочувствительные измерительные приборы. С целью предотвращения их порчи запрещается самовольно их регулировать или переставлять.

### **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

При проведении испытаний образцов и элементов конструкций возникает необходимость в измерении их начальных размеров, а также перемещений и деформаций, вызванных нагрузкой. Для этого используются соответствующие измерительные приборы с ценой деления  $a$ .

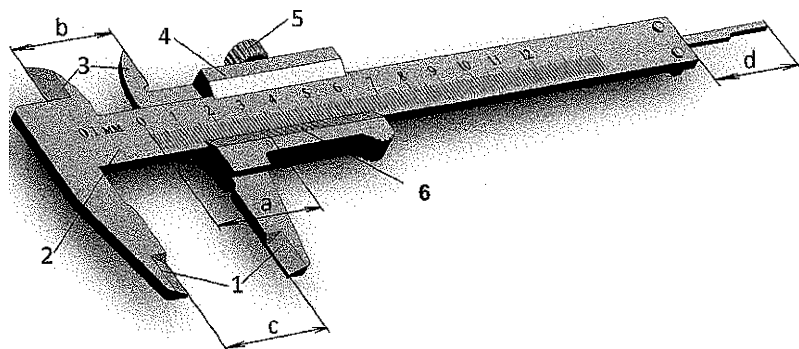
Для измерения размеров используются мерные ленты ( $a = 1 \text{ мм}$ ), штангенциркули ( $a = 0,05 \text{ мм}$  или  $a = 0,1 \text{ мм}$ ), микрометры ( $a = 0,01 \text{ мм}$ ), а для измерения перемещений – стрелочные индикаторы ( $a = 0,001 \text{ мм}$  и  $a = 0,01 \text{ мм}$ ). Деформации в материале конструкции, которые в упругой стадии очень малы, измеряются тензометрами различных конструкций: механическими и оптически ( $a = 0,001 \text{ мм}$ ) или электрическими ( $a = 0,001 \text{ мм}$ ).

#### **Штангенциркуль**

Штангенциркуль применяется для измерения наружных и внутренних размеров образцов и деталей. В лабораторной практике используются штангенциркули с пределом измерения до 125 мм и до 500 мм с точностью отсчета 0,05 мм и 0,1 мм. Штангенциркуль (рисунок 1) состоит из штанги 2, оканчивающейся губками 1 – для измерения наружных размеров, и 3 – для измерения внутренних размеров, и свободно передвигаемой по штанге рамки 4 с такими же губками.

На штанге 2 имеется шкала с делениями от 0 до 125 мм с шагом один миллиметр, а на рамке нанесены 10 делений нониуса 6, позволяющего делать отсчеты с точностью до 0,1 мм. На тыльной стороне штангенциркуля к рамке 4 прикреплен линейка 7, скользящая в канавке штанги и предназначена для измерения глубин. Рамка 4 снабжена стопорным винтом 5, которым она закреп-

ляется на штанге неподвижно, при необходимости получить шаблон размера. Штангенциркули других размеров с верхним пределом более 300 мм отличаются от описанных тем, что имеют односторонние губки только для измерения наружных размеров.



1 – нижние подвижные губки, 2 – штанга, 3 – верхние подвижные губки,  
 4 – рамка, 5 – стопор, 6 – нониус, 7 – линейка,  
 а – измеряемый размер, b – измеряемый внутренний размер, c – измеряемый наружный размер, d – измеряемая глубина

**Рисунок 1 – Штангенциркуль**

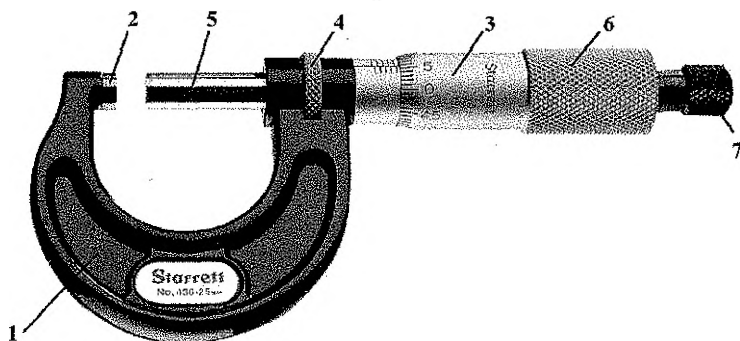
### Микрометр

Микрометры предназначены для измерения наружных размеров с точностью до 0,01 мм. Микрометр (рисунок 2) состоит из скобы 1, на одном конце которой установлена пятка 2, на другом – гильза 5. Внутри гильзы передвигается микрометрический винт 3, приводимый в движение барабаном 6. На гильзе нанесена продольная черта и поперечные штрихи через 1 мм. По штрихам, расположенным от продольной черты вниз и отмеченным цифрами через каждые 5 мм, производится отсчет целых миллиметров. Штрихи, проведенные от продольной черты вверх, делят пополам каждый миллиметр нижней шкалы.

Барабан 6 заканчивается конусом, по окружности которого расположена шкала из 50 равных делений. Шаг резьбы микрометрического винта равен 0,5 мм. Следовательно, при одном обороте барабана 6 микрометрический винт 3 и барабан получают продольное перемещение относительно гильзы на 0,5 мм, а шкала конического края барабана проходит все 50 делений. Таким образом, цена одного деления шкалы барабана составляет 0,01 мм.

Сотые доли миллиметра до величины 0,5 мм прочитываются по шкале конического края барабана 6 непосредственно, если ближайшим к этому краю является нижний поперечный штрих гильзы 5. Если же у края барабана 6 находится верхний поперечный штрих гильзы, как показано на рисунке 2, то к числу сотых миллиметра, прочитанных на барабане, нужно добавить 0,5 мм. (Например, на рисунке 2 микрометр показывает, что измеряемое расстояние равно 5,51 мм).

Барaban 6 на свободном конце снабжен головкой 7 с трещеткой, при вращении которой барабан вращается до тех пор, пока деталь не окажется зажатай между измерительными поверхностями винта и пятки с определенным давлением, после чего головка проворачивается с трещеткой. Этим обеспечивается постоянное измерительное усилие микрометрического винта и исключается влияние деформации детали на точность измерений. Стопорный винт 4 предназначен для неподвижного закрепления микрометрического винта при заданном размере.



1 – скоба, 2 – пятка, 3 – микрометрический винт,  
4 – стопор, 5 – гильза, 6 – барабан, 7 – головка с трещеткой

*Рисунок 2 – Микрометр*

### Стрелочный индикатор

Стрелочный индикатор (рисунок 3) предназначен для измерения линейных перемещений отдельных точек образцов, деталей и конструкций, вызванных их деформациями.

Шкала малого круга имеет 10 делений, каждое из которых соответствует 1 мм контактного стержня. Шкала большого круга имеет 100 делений с ценой одного деления  $\alpha = 1 \times 10^{-2}$  мм или  $\alpha = 1 \times 10^{-3}$  мм. При повороте малой стрелки на одно деление большая стрелка индикатора делает полный оборот.

Для проведения измерения индикатор закрепляется корпусом к неподвижной части конструкции или штативу 4, а головкой 3 касается детали 5 в точке, перемещение которой измеряется.

Измеренное перемещение точки обусловлено показаниями индикатора до и после деформации детали конструкции.

$$V = \Delta n \times \alpha_n,$$

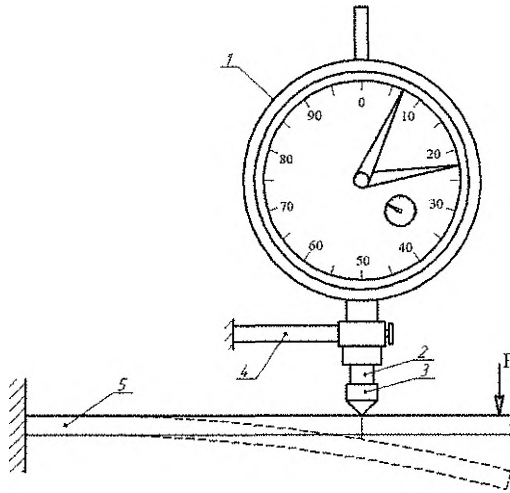
где  $V$  – измеряемое линейное перемещение;

$\Delta n$  – приращение показаний индикатора ( $\Delta n = n_1 - n_0$ );

$n_0$  – отсчет по индикатору до деформации;

$n_1$  – отсчет по индикатору после деформации;

$\alpha_n$  – цена деления индикатора.



1 – корпус со шкалой, 2 – контактный стержень, 3 – головка, 4 – штатив, 5 – деталь

*Рисунок 3 – Индикатор часового типа*

### Электротензометры

Электрический тензометр – это прибор, измеряющий относительную линейную деформацию на определенном участке твердого тела электрическим методом. Он состоит из трех частей: тензодатчика, усилителя и индикатора. Тензодатчик (или датчик) – это чувствительный элемент, воспринимающий измеряемую деформацию и преобразующий ее в тот или иной электрический параметр. Наиболее часто используются проволочные датчики сопротивления (тензорезисторы).

Проволочный датчик (рисунок 4а) изготавливается из проволоки с большим удельным сопротивлением (константан, нихром и др.) диаметром (0,02 – 0,05) мм и представляет собой плоскую петлеобразную решетку с выводами на концах. Проволочная решетка приклеивается к тонкой прямоугольной полоске специальной бумаги или пленки толщиной 0,05 мм, служащей для решетки основой и изолирующей её от материала испытуемой детали. Датчики сопротивления характеризуются базой  $l_0 = (5 - 100)$  мм и номинальным сопротивлением  $R = (10 - 800)$  Ом.

В электротензомерии наиболее распространена схема четырехплечевого моста (мостик Уитстона), состоящая из четырех последовательно соединенных датчиков, источника питания и индикатора (рисунок 4б). Один из датчиков левого плеча моста, наклеивается на исследуемую поверхность (рабочий датчик). Чтобы исключить влияние температуры, другой датчик, размещается на недеформированной части детали (термокомпенсационной) (рисунок 4в).

Для измерения деформации используются различные электрометрические приборы.

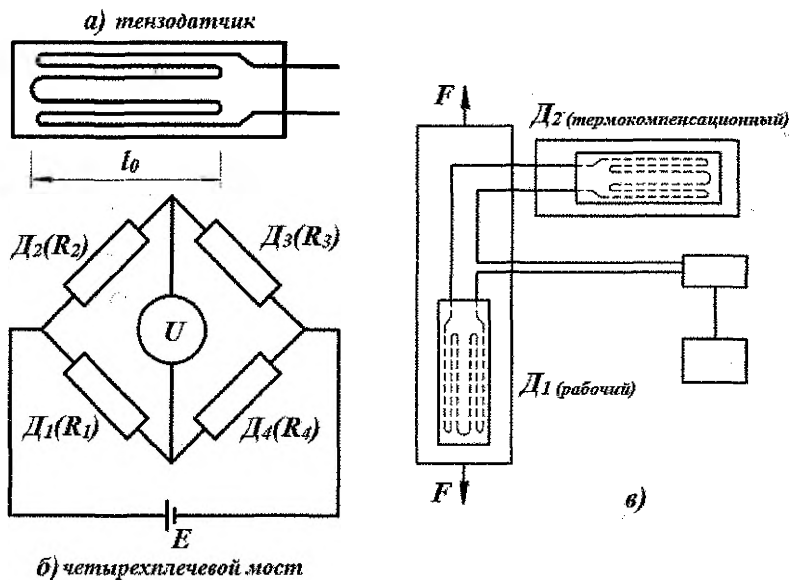


Рисунок 4 – Схема электротензометра

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### Испытание стального образца на растяжение

**Цель работы:** Определение механических характеристик и характеристик пластичности малоуглеродистой стали.

#### Содержание работы:

Для исследования различных материалов на растяжение изготавливаются специальные образцы. Образец должен обладать такой формой, чтобы в пределах определенной части его объема во время испытания осуществлялось центральное растяжение. Эта часть образца носит название рабочей части.

Для того чтобы результаты испытаний, проведенных различными лабораториями, можно было сравнить между собой, установлены типы и размеры образцов (ГОСТ 1479-84).

Обычно при испытаниях применяется образец, расчетная длина которого принимается равной  $10d_0$ , где  $d_0$  – диаметр рабочей части образца (рисунок 1.1).

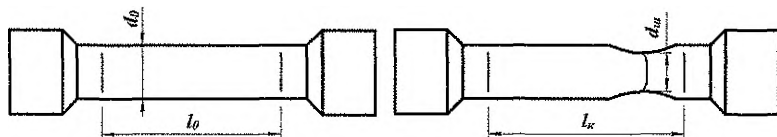
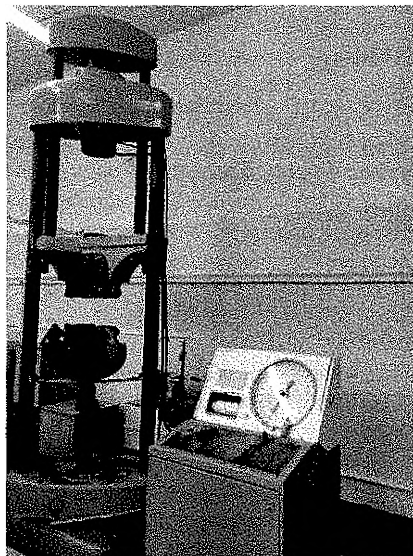


Рисунок 1.1– Металлический образец до и после испытания на растяжение



На рабочей части нормального образца наносятся риски для того, чтобы иметь возможность после опыта судить об изменении длины образца. Испытание производится на универсальной разрывной машине УММ-100 (рисунок 1.2). Она снабжена самопишущим устройством, которое автоматически вычерчивает диаграмму растяжения в определенном масштабе в координатах  $F - \Delta l$ . При статических испытаниях на растяжение образец деформируется при плавном возрастании нагрузки вплоть до разрыва. Автоматически вычерчивается кривая, показывающая функциональную зависимость между силой  $F$ , действующей на образец, и вызываемой ею деформацией  $\Delta l$  (рисунок 1.3).



*Рисунок 1.2 – Универсальная разрывная машина УММ-100*

Необходимо отметить, что данная диаграмма (рисунок 1.3) характеризует не свойства материала, а свойства образца. Чтобы дать характеристику свойствам материала, необходимо перестроить диаграмму растяжения  $F - f(\Delta l)$  в координатах  $\sigma = F/A_0$  и  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ , где  $A_0$  и  $l_0$  – соответственно площадь поперечного сечения и рабочая длина образца до нагружения. Полученная таким образом диаграмма называется диаграммой условных напряжений.

В начале испытания на диаграмме наблюдается горизонтальный и криволинейный участки, которые объясняются устранением зазоров как в механизме машины, так и между головками образца и захватами машины. Вслед за этим криволинейным участком наблюдается быстрый рост нагрузки. На диаграмме вычерчивается прямая  $OA$ , соответствующая пропорциональной зависимости между нагрузкой и удлинением образца. Чтобы исключить из диаграммы криволинейный участок, возникающий при устранении зазоров, необходимо продолжить прямолинейный участок, соответствующий закону Гука, до оси абсцисс, на пересечении которых получим точку  $O$  – начало координат диаграммы.

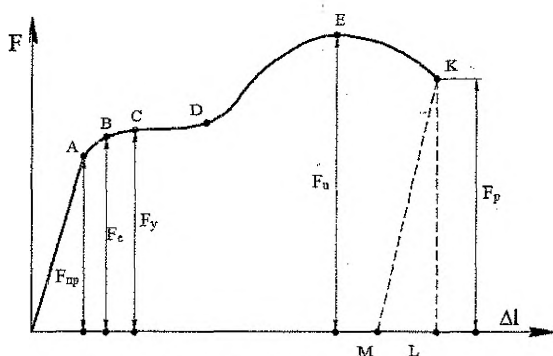


Рисунок 1.3 – Диаграмма растяжения

Прямолинейный участок диаграммы идет до некоторой точки  $A$ , за которой прекращается действие закона Гука. Нагрузка, соответствующая точке  $A$  ( $F_{пр}$ ) служит для вычисления предела пропорциональности. Пределом пропорциональности называется максимальное напряжение, до которого выполняется закон пропорциональности между напряжениями и деформациями.

$$\sigma_{пр} = \frac{F_{пр}}{A_0} \quad [МПа]. \quad (1.1)$$

Если приостановить испытание при нагрузке, меньшей  $F_{пр}$ , и разгрузить образец, то можно заметить линейную зависимость между нагрузкой и деформацией при разгрузке, которая будет выражаться той же прямой  $OA$ . Такое положение сохраняется до некоторого предела – предела упругости. Пределом упругости называется наибольшее напряжение, до которого возникают только упругие деформации (по некоторым стандартам от 0,05 до 0,005 %).

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad [МПа]. \quad (1.2)$$

Для большинства материалов разница между пределом упругости и пределом пропорциональности незначительная и поэтому часто определяют один из них.

На участке диаграммы за точкой  $C$  деформации будут расти без заметного возрастания растягивающей силы. Участок  $CD$  диаграммы называется площадкой текучести, которая представляет собой почти прямую линию, параллельную оси деформации. В период текучести материал претерпевает существенные структурные изменения, обусловленные массовыми сдвигами отдельных частиц материала. Если образец достаточно гладок и отшлифован, то в период текучести можно заметить потускнение его поверхности, а в увеличительное стекло увидеть сетку из мелких линий, наклоненных под углом близким к  $45^\circ$ , так как именно по этим площадкам действуют  $\tau_{max}$ . Эти линии являются результатом сдвига части материала образца и называются линиями Чернова.

Сила, соответствующая площадке текучести, на диаграмме обозначена  $F_y$ , а соответствующее ей напряжение называется пределом текучести. Предел те-

кучести  $\sigma_y$  – это напряжение, при котором образец деформируется без увеличения растягивающей нагрузки:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad [МПа]. \quad (1.3)$$

Однако не все материалы имеют ярко выраженную площадку текучести на кривой растяжения. Такие материалы как дюралюминий, легированные стали, стали с повышенным содержанием углерода и другие, почти не имеют площадки текучести. В этом случае рекомендуется определить так называемый условный предел текучести – это напряжение, при котором относительное удлинение достигает 0,2 % от длины расчетной части образца. За площадкой текучести нагрузка вновь начинает расти, так как материал упрочнился, приобрел возможность опять сопротивляться возрастающей нагрузке. Прямой пропорциональности уже нет, а диаграмма имеет криволинейный характер с максимумом в точке *E*. Наибольшая нагрузка  $F_u$ , которую может выдержать образец при растяжении, носит название предельной, а условие напряжение  $\sigma_u$ , соответствующее этой нагрузке называется пределом прочности или временным сопротивлением материала:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad [МПа]. \quad (1.4)$$

В процессе опыта можно наблюдать, что за пределом прочности деформации в образце распространяются не равномерно по всему объему, а сосредотачиваются в одном сечении, называемом шейкой. Шейка – резкое сужение сечения в каком-либо месте образца. При уменьшении сечения требуется меньшая сила для разрыва, поэтому за пределом прочности нагрузка убывает и довольно быстро наступает разрушение.

Следует отметить, что истинное напряжение, подсчитанное с учетом площади поперечного сечения шейки, все время возрастает вплоть до разрушения образца:

$$\sigma_p^u = \frac{F_p}{A_u} \quad [МПа], \quad (1.5)$$

где  $A_u$  – площадь шейки;

$F_p$  – нагрузка, при которой происходит разрыв образца (точка *K* диаграммы).

Участок *OB* диаграммы называют зоной упругих деформаций, *BC* – зоной упругопластических деформаций, *DE* – зоной упрочнения, *EK* – зоной местной текучести.

По диаграмме растяжения можно подсчитать полное удлинение образца в момент разрыва, оно будет выражаться отрезком *OL* (рисунок 1.2). Чтобы выделить только остаточную или только упругую деформации, достаточно из точки *K* диаграммы растяжения (рисунок 1.2) провести прямую, параллельную прямолинейному участку диаграммы *OA*. Тогда отрезок *OM* будет представлять остаточную деформацию образца, а отрезок *ML* – упругую. Упругие деформации исчезают в момент разрыва образца, а остаточные остаются, благодаря че-

му удлинение, полученное непосредственным измерением разорванного образца, соответствует отрезку  $OM$  диаграммы.

Интересен характер разрушения образца из пластичного материала (рис. 1.1). В месте разрыва образуется «чашечка», дно которой перпендикулярно к оси образца, а края наклонены под углом  $\alpha = 45^\circ$  к его оси. Это объясняется тем, что в плоскости поперечного сечения напряжения распределены по сложному параболическому закону с максимумом по оси образца. Поэтому разрыв образца начинается в центральной части. Оставшаяся кольцевая часть образца разрушается от наибольших касательных напряжений.

Кроме механических характеристик материала, по результатам испытания на разрыв определяются также характеристики пластичности: относительное остаточное удлинение после разрыва и относительное сужение образца.

Относительное остаточное удлинение:

$$\delta = \frac{l_x - l_0}{l_0} \times 100 \%. \quad (1.6)$$

Для определения длины  $l_k$  расчетной части образца после разрыва обе его части плотно складываются и производится замер.

Относительное остаточное сужение:

$$\psi = \frac{A_0 - A_m}{A_0} \times 100 \%, \quad (1.7)$$

где  $A_m$  — площадь шейки.

Для определения  $A_m$  обе части образца после разрыва складываются и измеряется минимальный диаметр шейки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, затем как среднее арифметическое этих двух замеров вычисляется площадь шейки  $A_m$ .

Чем больше  $\delta$  и  $\psi$ , тем более пластичным является материал.

### Порядок проведения испытаний

1. Измеряют диаметр образца (до испытания) штангенциркулем и результаты измерений заносят в таблицу 1.1.
2. Вычисляют первоначальную площадь рабочей части образца  $A_0$ .
3. Наносят риски, обозначая расчетную длину образца  $l_0 = 10d_0$ .
4. Устанавливают образцы в захваты разрывной машины.
5. Нагружают образцы и наблюдают за вычерчиваемой диаграммой.
6. В процессе нагружения в таблицу 1.1 заносят значения нагрузок, соответствующих характерным точкам на диаграмме.
7. Измеряют размеры образца после разрыва и заносят их в таблицу.

### Обработка результатов эксперимента

1. Отмечают на диаграмме характерные точки, соответствующие нагрузкам  $F_{pr}$ ,  $F_y$ ,  $F_b$ ,  $F_p$ .
2. Устанавливают масштаб диаграммы.
3. Вычисляют механические характеристики  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_p^u$ . Результаты заносят в таблицу 1.1.

4. Измеряют расстояние между рисками после разрыва образца  $l_k$ , плотно сложив две его части, а также диаметр шейки  $d_{ш}$ .
5. Вычисляют относительное остаточное удлинение образца и результаты вычислений заносят в таблицу 1.1.
6. Вычисляют относительное остаточное сужение площади сечения в месте разрыва образца и результаты измерений заносят в таблицу 1.1.
7. Строят диаграмму условных напряжений (рисунок 1.4).

Таблица 1.1

Материал	Размер образца						$F_{pr},$ Н	$F_y,$ Н	$F_u,$ Н	$F_p,$ Н	Механические ха- рактеристики				Характеристики пластичности	
	до опыта			после опыта							$\sigma_{pr}$	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$\sigma_p$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
	$d,$ м	$l_0,$ м	$A_0,$ м <sup>2</sup>	$d_{ш},$ м	$l_k,$ м	$A_{ш},$ м <sup>2</sup>					МПа					
Сталь																

По результатам, полученным из опыта, можно судить о качестве материала. Пользуясь механическим справочными характеристиками, устанавливают марку материала и в соответствии с этим решают, в каких конструкциях этот материал может быть применен.

По результатам испытаний можно определить, пластичным или хрупким является материал. У пластичных материалов (например, малоуглеродистая сталь), остаточные деформации могут достигать 25 %. У хрупких материалов (инструментальные стали, чугун) остаточные деформации не превышают несколько процентов.

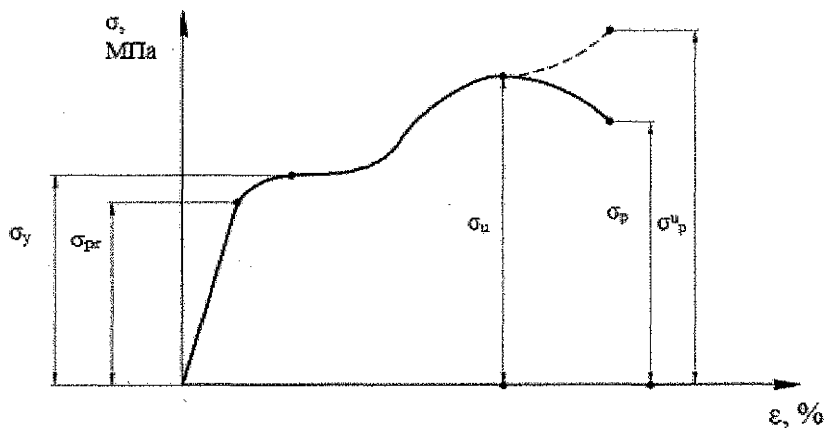


Рисунок 1.4 – Диаграмма условных напряжений

## Контрольные вопросы.

1. Какие требования предъявляются к размерам экспериментального образца?
2. Назовите известные вам механические характеристики прочности и пластичности. Дайте их определения.
3. Как определялись после проведения опыта механические характеристики прочности и пластичности?
4. Истинные или условные значения напряжений были получены при подсчете механических характеристик прочности?
5. Покажите вид диаграмм истинных и условных напряжений, соответствующих проведенному опыту.
6. Как по диаграмме растяжения образца определить величину остаточной и упругой деформации в любой момент испытания?
7. Как остаточные деформации распределялись по длине образца до того момента испытания, когда начала развиваться шейка?
8. В чем состоит суть явления наклепа? Покажите вид диаграмм растяжения не наклепанного и наклепанного материала на примере проведенного в работе опыта.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Определение модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации

**Цель работы:** Ознакомление с методикой экспериментального определения модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

#### Содержание работы.

Модулем упругости  $E$  при растяжении называется коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением  $\sigma$  и соответствующим ему относительным удлинением  $\varepsilon$ :

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Модуль упругости  $E$  отражает сопротивляемость материала упругим деформациям при растяжении (сжатии). Чем больше эта величина, тем меньше растяжение (сжатие) стержня при прочих равных условиях (длина  $l$ , площадь поперечного сечения  $A$ , сила  $F$ ). Это следует из формулы, выражающей закон Гука:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}.$$

Модуль упругости  $E$  является одной из основных упругих характеристик материала. Он имеет важное значение для вычисления упругих деформаций различных элементов конструкций. Модуль упругости находится из зависимости:

$$E = \frac{Fl}{A\Delta l} = \frac{F}{\varepsilon A}. \quad (2.1)$$

Коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона  $\nu$  называется отношение по модулю относительной поперечной деформации образца при растяжении или сжатии  $\varepsilon'$  к его относительной продольной деформации  $\varepsilon$ , найденных в пределах пропорциональности:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \left| \frac{\Delta\varepsilon \cdot l}{b \cdot \Delta l} \right|, \quad (2.2)$$

где  $b$  – ширина сечения образца;

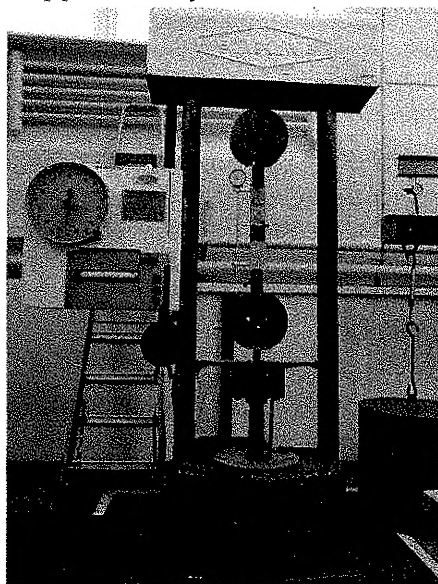
$l$  – расчетная длина образца (база индикатора часового типа).

Это отношение для каждого материала в пределах упругости является величиной постоянной.  $E$  и  $\nu$  характеризуют упругие свойства материала.

В данной работе для испытания используется образец прямоугольного поперечного сечения. Так как модуль упругости и коэффициент Пуассона сохраняют свои постоянные значения, пока справедлив закон Гука, то величина максимальной нагрузки определяется из соотношения:

$$\Delta F = \frac{F_{\max}}{n}.$$

Для определения модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  может быть использован эксперимент: абсолютные продольные и абсолютные поперечные деформации измеряются индикаторами часового типа. При этом для определения абсолютной поперечной деформации, которая всегда меньше продольной, устанавливают индикатор 2 часового типа с более мелкой ценой деления (0,001 мм), чем индикатор 1 для измерения абсолютной продольной деформации (0,002 мм). Схема установки для определения модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  показана на рисунках 2.1 и 2.2.



*Рисунок 2.1 – установка для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона*

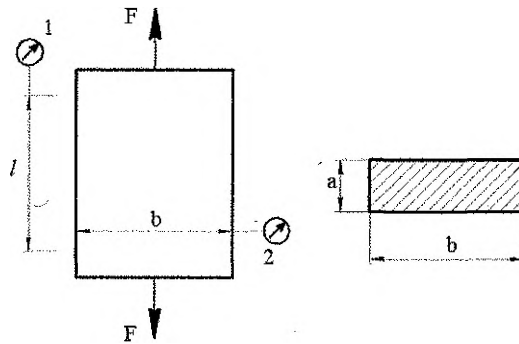


Рисунок 2.2 – Схема установки

### Порядок проведения эксперимента

Замеряются размеры сечения образца  $b$  и  $a$ , расчетная длина  $l$ . Определяется величина максимальной нагрузки:  $F_{max} = \sigma_{pr} \times A$ ; задаются числом нагружений и подсчитывают интервал нагрузки:

$$\Delta F = \frac{F_{max}}{n}$$

Образец закрепляется в захватах испытанной нагрузкой, равной  $(0,1-0,2) \times F_{max}$  для устранения влияния проскальзывания и обжатия образца. Эта нагрузка принимается условно за нуль.

При начальной нагрузке производятся первые отсчеты по индикаторам 1 и 2 (рисунок 2.1). По индикатору 1 определяют абсолютную продольную деформацию  $\Delta l$ , а по индикатору 2 – абсолютную поперечную деформацию  $\Delta b$ . Затем нагрузку увеличивают равными ступенями так, чтобы число ступеней нагружения было равным  $n$ . Для каждой ступени нагружения производятся отсчеты по индикаторам и результаты записываются в журнале наблюдений (таблица 2.1).

### Обработка результатов эксперимента

По данным опыта строятся графики  $F = f(\Delta l)$ , которые наглядно иллюстрируют прямую пропорциональность между нагрузкой и деформацией образца.

По формулам (2.1) и (2.2) для каждой ступени нагружения определяют модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  и результаты заносят в таблицу 2.1.

### Контрольные вопросы

1. Какие упругие постоянные определяются в работе? Дайте их определения.
2. Опишите методику проведения опыта по определению упругих постоянных материала.
3. Чем можно подтвердить, что в процессе испытания имеют место только упругие деформации и что закон Гука не нарушается?
4. Какова формула для определения коэффициента Пуассона?
5. Как при обработке результатов подсчитывается модуль продольной упругости материала образца?



Таблица 2.1

Материал	Размеры образца			$A, \text{ м}^2$	$F, \text{ Н}$	Абсолютная деформация		$E, \text{ МПа}$	$\nu$	$E_{ср}, \text{ МПа}$	$\nu_{ср}$
	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$l, \text{ м}$			$\Delta l$	$\Delta b$				
Сталь											
Резина											
Пробка	$d, \text{ м}$	$l, \text{ м}$									

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### Испытание материалов на сжатие

**Цель работы:** Изучение свойств пластичных, хрупких и анизотропных материалов при испытании на сжатие.

#### Содержание работы

Не все материалы в одинаковой степени сопротивляются растяжению и сжатию. Такие материалы, как чугун, дерево, камень плохо сопротивляются растяжению, но очень хорошо работают на сжатие. Для получения механических характеристик хрупких и анизотропных материалов необходимо производить испытания и на сжатие. Причем дерево, как анизотропный материал, испытывается на сжатие вдоль и поперек волокон. При испытании хрупких материалов определяется предел прочности, который имеет большое практическое значение, так как такие материалы обычно применяются для изготовления деталей, претерпевающих деформацию сжатия.

Пластичные же материалы на сжатие испытываются редко, в основном с исследовательской целью (ГОСТ 25503-80). Явление простого сжатия можно получить только в сравнительно коротких образцах. В длинных образцах одновременно с сжатием может возникнуть так называемый продольный изгиб. Чтобы избежать этого явления, образцы из металлов изготавливаются в виде цилиндров с высотой  $l_0$  не превышающей трех диаметров  $l_0 = (1-3)d_0$ . Для прочих материалов – дерево, камень – образцы изготавливаются в виде стандартных кубиков.

### Сжатие образца из малоуглеродистой стали

Образцы для испытания пластичных материалов изготавливаются в виде коротких цилиндров (ГОСТ 8817-80), в соответствии с которым диаметр образца  $d_0 = (20 - 30)$  мм, а высота его  $l_0 = (1 - 3)d_0$  (рисунок 3.2).

При сжатии возникают силы трения между плитами испытательной машины и торцами образца (рисунок 3.2), которые препятствуют свободному расширению прилегающей к торцам части материала. Образец при этом принимает бочкообразную форму. Смазыванием опорных поверхностей образца маслом или парафином можно значительно уменьшить силы трения. Кроме того, влияние сил трения можно уменьшить, применив трубчатый образец для испытания на сжатие пластичных материалов. Такой образец представляет собой трубу с коническими торцами.

Испытание производится на машине (прессе) ПММ-125. Перед установкой образца между плитами испытательной машины он подвергается измерению и внешнему осмотру. При осмотре обращается внимание на параллельность торцов образца и на качество между плитами испытательной машины. В ходе испытания образец постепенно нагружается непрерывно возрастающей нагрузкой.

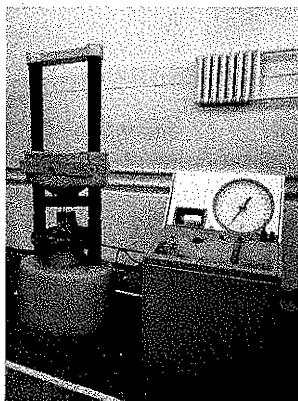


Рисунок 3.1 – Машина-пресс ПММ-125

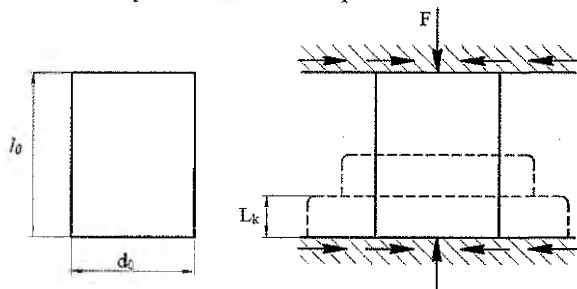


Рисунок 3.2 – Сжатие образца. Силы трения при сжатии образцов

Самопишущий прибор машины при нагружении автоматически вычеркивает диаграмму сжатия в координатах  $F - \Delta l$  (рисунок 3.3).

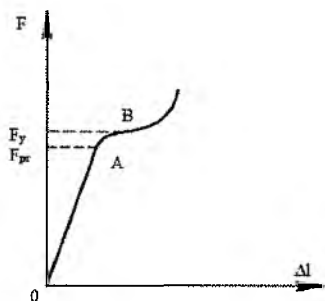


Рисунок 3.3 – Диаграмма сжатия малоуглеродистой стали

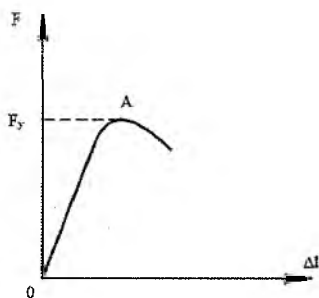


Рисунок 3.4 – Диаграмма сжатия чугуна

До некоторой точки *A* на диаграмме наблюдается, как при растяжении, прямая линия; существует пропорциональная зависимость между нагрузкой и укорочением. Ордината точки *A* соответствует пределу пропорциональности малоуглеродистой стали. Начиная от точки *A*, появляются уже пластические деформации, которые за точкой *B* растут без увеличения нагрузки. Однако площадка текучести при сжатии пластического материала выявляется слабо. В дальнейшем не наблюдается падение нагрузки, как при растяжении, а диаграмма непрерывно идет вверх по некоторой кривой. Это объясняется тем, что за пределом пропорциональности появляются заметные остаточные деформации. Образец укорачивается, сечение его увеличивается и он становится способным выдерживать все большую нагрузку. Довести до разрушения образец из пластичного материала не представляется возможным. Испытываемый образец сжимается и тонкий диск без видимых признаков разрушения (рисунок 3.2). Поэтому не удастся найти разрушающую нагрузку, а следовательно, и предел прочности пластичного материала при сжатии. При сжатии пластичного материала можно получить предел пропорциональности и предел текучести:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0} \quad [\text{МПа}], \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad [\text{МПа}], \quad (3.2)$$

где  $A_0$  – первоначальная площадь образца.

Заметим, что значение предела пропорциональности и предела текучести для пластичного материала при сжатии и при растяжении практически одинаково.

При сжатии пластичных материалов, как и при растяжении, имеет место наклёп.

### Сжатие образца из чугуна

При испытании чугуна на сжатие применяются цилиндрические образцы. ГОСТ 2055-81 устанавливает следующие соотношения между размерами образцов для испытания чугуна:  $d_0 = 10 \dots 25 \text{ мм}$ ,  $l_0 = (1/3)d_0$ . Порядок испытания чугунного образца на сжатие аналогичен порядку испытания на сжатие стального образца.

При постепенно возрастающей нагрузке самоиндуцирующий прибор машины автоматически вычерчивает диаграмму сжатия в координатах  $F - \Delta l$  (рисунок 3.4).

Уже в самом начале диаграмма не имеет линейного участка: отсутствует площадка текучести. При достижении максимальной нагрузки она резко обрывается. Хрупкие материалы при сжатии, как и при растяжении, разрушаются при малых деформациях. В процессе испытания образец укорачивается и приобретает слабо выраженную бочкообразную форму ввиду наличия трения по торцам образца. В момент, когда нагрузка достигает своего максимального значения, образец разрушается, при этом на его поверхности появляется ряд наклонных трещин под углом  $45-50^\circ$ . Характер разрушения показан на рисунке 3.5.

При смазывании торцов образца парафином характер разрушения будет иным. Образец не будет принимать бочкообразную форму, а разрушение произойдет путем образования продольных трещин по его высоте.

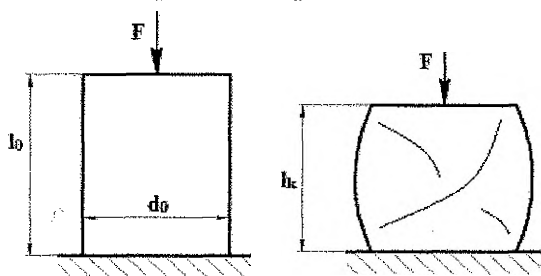


Рисунок 3.5 – Характер разрушения хрупкого образца

Разрушение чугуна происходит внезапно, чем объясняется резкое падение нагрузки характерное для хрупких материалов. Испытание на сжатие хрупких материалов дает возможность получить предел прочности материала на сжатие.

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad [МПа]. \quad (3.3)$$

Предел прочности для хрупких материалов при сжатии значительно больше, чем при растяжении.

### Сжатие древесины вдоль и поперёк волокон

При испытании деревянных образцов получается резко отличные результаты в зависимости от направления приложения нагрузки по отношению к волокнам; так как дерево является анизотропным материалом, поэтому необходимо производить испытания дерева вдоль и поперек волокон. Для испытания изготавливаются кубики стандартных размеров  $50 \times 50$  мм, которые после обмера и внешнего осмотра подвергаются сжатию до разрушения: внешний осмотр должен производиться тщательно, ибо наличие косослоя и сучков изменяют работу материала.

При испытании производится запись результатов испытания в виде диаграммы  $F - \Delta l$ . Характер разрушения деревянного кубика зависит от направления приложения силы по отношению к волокнам. Образец, сжимаемый вдоль воло-

кон, до разрушения претерпевает сравнительно небольшие остаточные деформации после достижения нагрузкой наибольшего значения  $F_u$  (рисунок 3.6) начинается разрушение образца с последующим падением нагрузки (кривая I). Разрушение происходит с образованием поперечных складок и смятия торцов. При наличии сучков в древесине одновременно с этим могут появиться и продольные трещины. Вид разрушения кубика при сжатии вдоль волокон показан на рисунке 3.7.

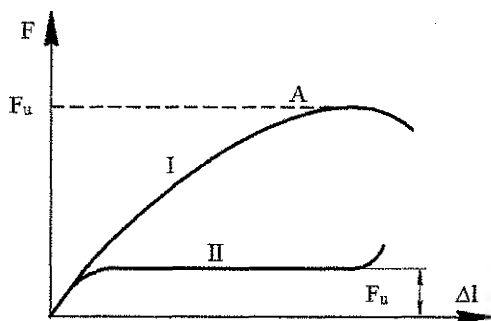


Рисунок 3.6 – Диаграмма сжатия дерева

По данным опыта определяется предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон по формуле (3.3).

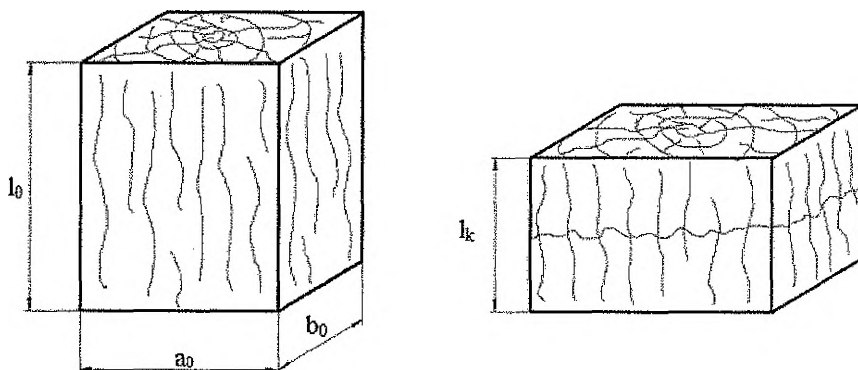
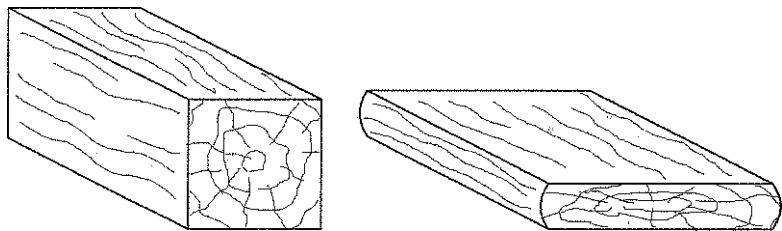


Рисунок 3.7 – Характер разрушения деревянного кубика при сжатии вдоль волокон

При испытании дерева поперек волокон картина получается несколько иная. Начальный участок диаграммы представляет собой наклонную прямую до нагрузки  $F_{pr}$  соответствующей пределу пропорциональности (кривая II). Затем диаграмма приобретает вид слабо изогнутой кривой, почти параллельной оси абсцисс. Кубик быстро деформируется при слабом возрастании нагрузки. Если древесина не имеет пороков, то разрушение кубика не наблюдается, он лишь значительно спрессовывается. Принято считать, что значительный рост деформации при слабом возрастании нагрузки указывает на то, что несущая способность образца исчерпана. За разрушающую нагрузку принимают ту нагрузку, при которой кубик сжимается на 1/3 своей первоначальной высоты. В результа-

те испытания вычисляется предел прочности древесины при сжатии поперек волокон. Следует заметить, что прочность древесины вдоль волокон в 8 - 10 раз выше, чем прочность поперек волокон.



*Рисунок 3.8 – Характер разрушения деревянного кубика при сжатии поперёк волокон*

### **Порядок выполнения испытаний**

1. Производят измерение образцов штангенциркулем или микрометром и результаты вычислений заносят в таблицу 3.1.
2. Вычисляют первоначальные площади поперечного сечения и результаты вычислений заносят в таблицу 3.1.
3. Устанавливают образцы между плитами испытательной машины.
4. Нагружают образцы и наблюдают за вычерчиваемой диаграммой. Нагрузка дается до полного разрушения образцов.

### **Обработка результатов испытаний**

1. Измеряют высоту  $l_k$ , после испытания и результаты измерений заносят в таблицу 1.
2. Для пластичных материалов из диаграммы определяют силы  $F_{pr}$  и  $F_y$ , для хрупких материалов – силу  $F_u$  и их значения заносят в таблицу 3.1.
3. По формулам (3.1–3.3) определяют  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$  результаты вычислений заносят в таблицу 3.1.
4. По формуле 1.6 определяют относительную деформацию и результаты вычислений заносят в таблицу 3.1.
5. Строятся диаграммы условных напряжений для стали, чугуна и древесины.

### **Контрольные вопросы**

6. По каким признакам материалы делят на пластичные и хрупкие?
7. Какие из испытываемых образцов вели себя при сжатии как пластичные, а какие как хрупкие?
8. Какие механические характеристики удалось определить в результате испытания на сжатие образцов из пластичной стали, чугуна, дерева вдоль и поперек волокон?
9. Как изменилась форма образцов из стали и чугуна в процессе испытания? Чем можно это объяснить?
10. Как ориентированы трещины, образовавшиеся при разрушении чугунного образца? Чем можно объяснить такую ориентацию трещин?
11. Какие материалы называют изотропными, а какие анизотропными?

Таблица 3.1

Материал	Размеры образцов				$F_{pr}$ Н	$F_y$ Н	$F_u$ Н	$\sigma_{pr}$ МПа	$\sigma_y$ МПа	$\sigma_u$ МПа	$\delta$ , %
	До опыта			После опыта							
	$d_0$ м	$l_0$ м	$A_0$ м <sup>2</sup>	$l_k$ м							
Сталь											
Чугун											
Дерево вдоль волокон											
Дерево поперек волокон											

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Испытание материалов на срез

**Цель работы:** определить предел прочности стального образца на срез и деревянного образца на скалывание.

#### Содержание работы

Деформация чистого сдвига является частным случаем плоского напряженного состояния, когда по граням прямоугольного элемента, выделенного в окрестностях некоторой точки нагруженного тела, действуют только касательные напряжения.

Методы расчета болтовых, заклепочных соединений, врубок опираются на теорию чистого сдвига. Условие прочности при сдвиге записывается:

$$\tau = \frac{F}{A_{cp}} \leq R_{cp}, \quad (4.1)$$

где  $R_{cp}$  – расчетное сопротивление материала на срез.

Теоретически расчетное сопротивление  $R_{cp}$  определяется в зависимости от принятой теории прочности. Например, по теории наибольших касательных напряжений  $R_{cp} = 0,5R_p$ , где  $R_p$  – расчетное сопротивление материала при растяжении, по энергетической теории прочности.

Приспособление для испытания металла на срез (рисунок 4.1) состоит из проушины и серьги.

Испытываемый образец закладывают в приспособление, которое закрепляется в захватах разрывной машины УММ-100, и загружают постепенно возрастающей нагрузкой вплоть до разрушения. Образец будет перерезаться по двум площадкам:

$$\tau_{cp} = \frac{F_u}{2A_{cp}}; \quad A_{cp} = \frac{\pi d_0^2}{4}. \quad (4.2)$$

Кроме того, образец будет сминаться по цилиндрическим поверхностям. Максимальные напряжения смятия:

$$\sigma_{см} = \frac{F_u}{A_{см}}; \quad A_{см} = t_{min} \times d_0. \quad (4.3)$$

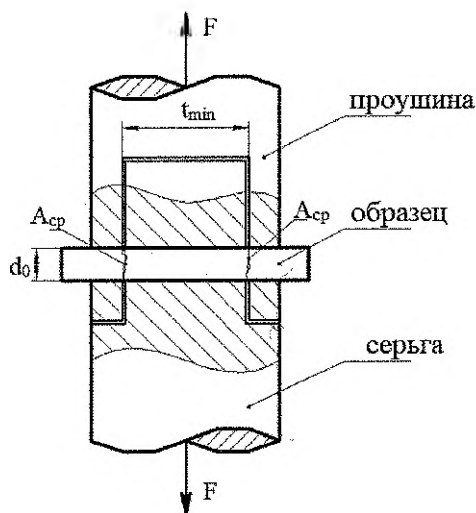


Рисунок 4.1 – Приспособление для испытания металла на срез

При испытании дерева на скалывание образец устанавливается в приспособление (рисунок 4.2), которое помещается под плиты машины ПММ-125 и загружается непрерывно возрастающей нагрузкой вплоть до разрушения. Напряжение скалывания определяют по формуле:

$$\tau_{ск} = \frac{F_u}{A_{ск}}, \quad (4.4)$$

где  $A_{ск} = b \times l$  ( $m^2$ ).

Максимальные напряжения смятия определяют по формуле:

$$\sigma_{см} = \frac{F_u}{A_{см}}, \quad (4.5)$$

где  $A_{см} = a \times b$  ( $m^2$ ).

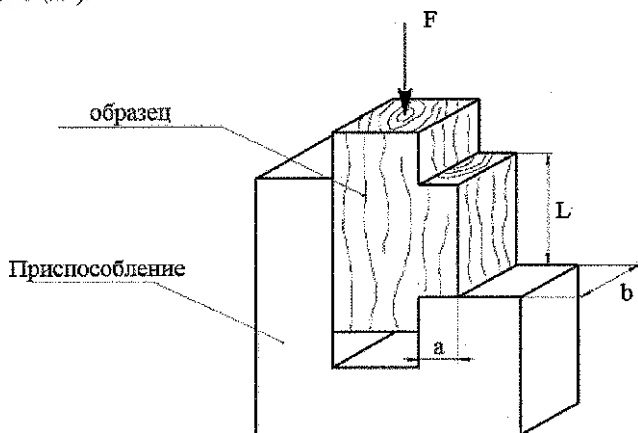


Рисунок 4.2 – Приспособление и образец для испытания дерева на скалывание



### Порядок проведения испытаний

1. Производят измерение образцов штангенциркулем и результаты измерений заносят в таблицу 4.1.
2. Определяют площади среза, смятия для металлического образца, площадь скалывания и смятия деревянного образца и результаты вычислений заносим в таблицу 4.1.
3. Образец помещают в приспособление, которое устанавливается испытательные машины.
4. Производят нагружение образца до разрушения и записывают величины нагрузок.

### Обработка результатов испытаний

1. По формулам (4.1, 4.4) определяют предел прочности на срез металлического образца и предел прочности на скалывание деревянного образца.
2. Полученные пределы прочности сравнивают с пределами прочности, вычисленными по одной из теорий прочности.
3. По формулам (4.2–4.5) определяют напряжения смятия для металлического и деревянного образцов.
4. Сравнивают напряжения смятия с пределом прочности на срез и скалывание в данном конкретном опыте.

Таблица 4.1.

Материал	Размеры образцов, <i>m</i>				$A_{ср},$ $m^2$	$A_{ск},$ $m^2$	$A_{см},$ $m^2$	$\tau_{ср},$ $МПа$	$\sigma_{см},$ $МПа$	$\tau_{ск},$ $МПа$
	$d_o$	$a$	$b$	$l$						
Сталь										
Дерево										

### Контрольные вопросы

1. Опишите схему приспособления, применяющегося для испытания стального образца на срез.
2. Покажите, по каким площадкам происходит срез, скалывание и смятие образцов.
3. Как определялась на опыте и чему равна величина предела прочности образцов при срезе и скалывании?
4. Как определялись напряжения смятия для стального и деревянного образцов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Испытание круглого стального стержня на кручение и винтовых цилиндрических пружин с малым шагом винтов

**Цель работы:** Определение модуля сдвига стали и сравнение его с табличным значением.

#### Содержание работы

Для расчета конструктивных элементов, работающих на срез и кручение, необходимо иметь модуль сдвига  $G$  для различных материалов, который определяется опытным путем.

Испытание круглого стального стержня производится на следующей установке (рисунок 5.1).

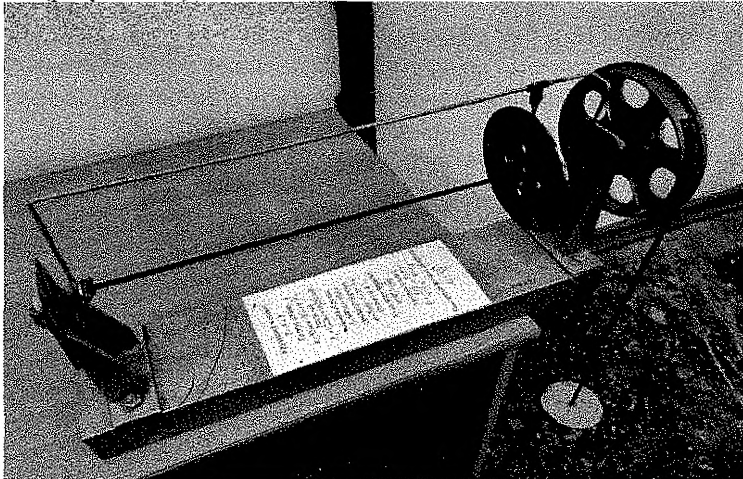
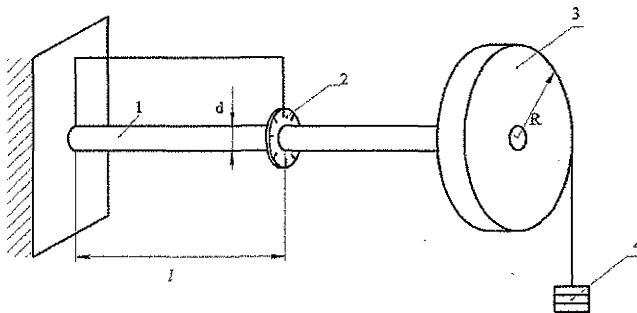


Рисунок 5.1 – Установка для испытаний на кручение



1 – опытный образец, 2 – измеритель угла закручивания, 3 – колесо для создания скручивающего момента, 4 – нагрузитель

Рисунок 5.2 – Схема установки для испытаний на кручение

Модуль сдвига  $G$  определяется из формулы:

$$\varphi = \frac{T \cdot l}{G \cdot J_p}, \quad (5.1)$$

откуда  $G = \frac{T \cdot l}{\varphi \cdot J_p},$

где  $T = F \times R$  – крутящий момент;

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32} \text{ – полярный момент инерции поперечного сечения.}$$

Угол закручивания на установке определяется в градусах, поэтому угол  $\varphi$  находится по формуле:

$$\varphi = \varphi^\circ \frac{\pi}{180^\circ}.$$

Окончательная формула для определения модуля сдвига будет иметь вид:

$$G = \frac{F \cdot R \cdot l \cdot 180^\circ \cdot 32}{\varphi^\circ \cdot \pi^2 \cdot d^4}. \quad (5.2)$$

### Порядок проведения испытаний

1. Подвешивается груз  $4$  и измеряется угол закручивания не менее трех раз.
2. Измеряются параметры установки  $l, R, d$ .
3. Полученные данные подставляют в формулу (5.2) и определяют модуль сдвига.
4. Результаты заносят в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	$R$ , мм	$D$ , мм	$l$ , мм	$F$ , Н	$\varphi^\circ$	$G$ , МПа	Примечание
1	85	5	400				
2							
3							
$G_{\text{ср}} =$							

Испытания пружины производятся на установке, показанной на рисунке 5.2. При действии на пружину растягивающих или сжимающих сил  $F$  в поперечном сечении витка возникает крутящий момент  $T$  и поперечная сила  $Q$ . При расчетах учитывают только деформацию кручения и пренебрегают сдвигом. В этом случае осадка пружины определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{4F \cdot R^3 \cdot n}{G \cdot r^4}, \quad (5.3)$$

откуда:

$$G = \frac{4F \cdot R^3 \cdot n}{\lambda \cdot r^4},$$

где  $F$  – заданная нагрузка;

$r$  – радиус проволоки, из которой свита пружина;

$R$  – средний радиус витка пружины, определяемый по формуле:

$$R = \frac{D-d}{2}, \quad (5.4)$$

- где  $D$  – наружный диаметр пружины;  
 $d$  – диаметр проволоки, из которой свита пружина;  
 $n$  – количество витков пружины;  
 $\lambda$  – осадка пружины, определяемая из опыта.

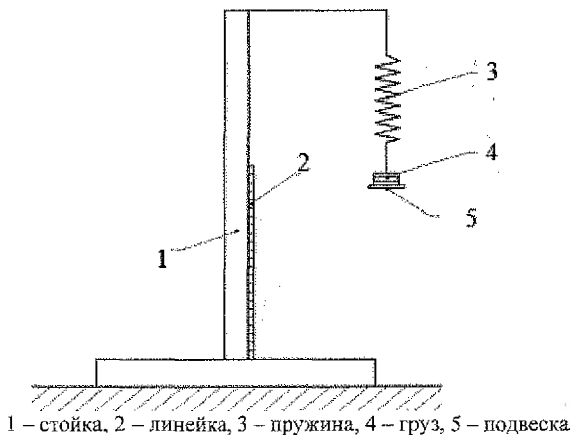


Рисунок 5.3 – Экспериментальная установка

### Порядок проведения испытаний

1. С помощью штангенциркуля измеряется диаметр витка пружины  $D$  и диаметр проволоки  $d$  с точностью до 0,1 мм.
2. По формуле (5.4) определяется средний радиус витка пружины.
3. Определяют число витков пружины  $n$ , считая и неполные.
4. Загружают подвеску 5 сменными грузами 4, каждый раз измеряя по линейке 2 осадку пружины.
5. Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

№ п/п	$R$ , мм	$r$ , мм	$n$	$F$ , Н	$l_0$ , мм	$l$ , мм	$\lambda$ , мм	$G$ , МПа	Примечание
$G_{\text{ср}} =$									

### Выводы по работе

1. Сделать заключение: подчиняется ли материал закону Гука.
2. Сравнить опытные значения модуля  $G$  с табличными данными.

## Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон Гука при сдвиге?
2. Что такое угол закручивания?
3. Опишите методику проведения опытов.
4. Перечислите, какие упругие постоянные материалов вам известны. Связь между ними.
5. Как определить осадку пружины?
6. Что называется жесткостью при кручении? Какие напряжения возникают в поперечном сечении круглого стержня?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### Определение коэффициента концентрации напряжений поляризационно-оптическим методом

**Цель работы:** ознакомиться с поляризационно-оптическим методом определения коэффициента концентрации напряжений.

#### Содержание работы

Формула  $\sigma = N / A$  для определения напряжений при растяжении (сжатии) справедлива только в том случае, когда сечение отстоит на достаточном расстоянии от мест резкого изменения формы тела (выточек, отверстий и т.д.). В местах резкого изменения формы тела, у надрезов и трещин наблюдается резкое увеличение напряжений, которое называется концентрацией напряжений (рисунок 6.1).

В общем случае теоретическим коэффициентом концентрации напряжений называется отношение максимального напряжения, вычисленного с учетом концентрации (в предположении совершенной упругости), к номинальному напряжению в том же токе.

За нормальное напряжение принимают такое напряжение, которое определяется по обычным формулам сопротивления материалов без учета эффекта концентрации. Обычно номинальное напряжение определяют для ослабленного сечения. Так, например, для полосы, ослабленной отверстием (рисунок 6.1).

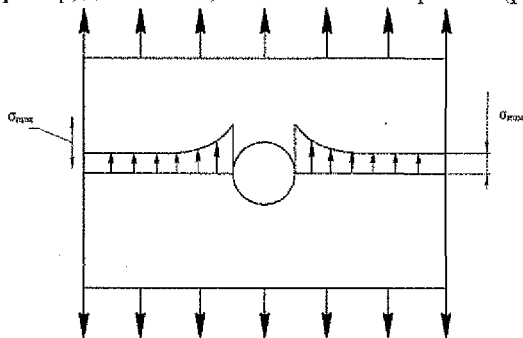


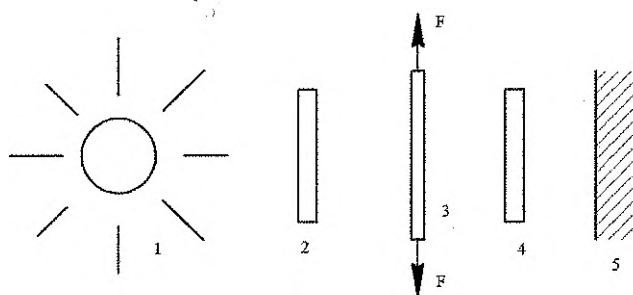
Рисунок 6.1 – Концентрация напряжений

Очевидно, что теоретический коэффициент концентрации напряжений не может быть меньше единицы.

Как правило, коэффициент концентрации напряжений определяют экспериментальным путем.

Поляризационно-оптический метод основан на том, что некоторые прозрачные материалы при деформации становятся статически анизотропными, в деформированном состоянии они приобретают свойство двойного лучепреломления (стекло, целлулоид, бакелит и др.). В оптическом методе исследуется не сама деталь, а ее модель, изготовленная из такого материала. Модель помещается в оптическую установку, называемую полярископом, где она просвечивается пучком поляризованного света. Поляризатор пропускает колебания в строго определенной плоскости, а составляющие колебаний, перпендикулярные ей, гасит.

На рисунке 6.2 схематически показано расположение основных частей полярископа с плоской поляризацией света.



1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – модель, 4 – анализатор, 5 – экран

*Рисунок 6.2 – Схема установки полярископа с плоской поляризацией света*

Одними из основных частей полярископа являются поляризатор и анализатор, но в рабочем положении повернутые так, что их плоскости поляризации взаимно перпендикулярны. В этом случае луч света, прошедший сквозь поляризатор, будет погашен анализатором, если модель отсутствует или она не нагружена. Это положение поляризатора и анализатора называют установкой на темноту.

Если к модели приложить нагрузку, то она будет деформироваться, материал модели станет оптически анизотропным, и она будет вести себя, как кристаллическое тело, обладающее свойством двойного лучепреломления.

Другими словами, при нагрузке модель приобретает свойство поворачивать в зависимости от величины напряжений плоскость поляризации проходящего через нее света. Тогда свет с повернутой плоскостью поляризации частично проходит через анализатор, давая на экране изображение исследуемой модели. Интенсивность изображения и его цвет зависят от величины напряжений.

### Порядок проведения испытаний

С помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм измеряют размеры поперечного сечения образцов из прозрачного материала. Образец без концентраторов напряжений принимают за эталонный, образцы с концентраторами, в качестве модели.

Закрепляют эталон в захваты разрывной машины, устанавливают поляризатор и анализатор на темноту. Загружают эталон и ведут наблюдения за экраном. При появлении по всему эталону на экране обусловленного ранее цвета записывают величину соответствующей нагрузки.

Подобным образом испытывают модели. В моделях на экране цвет, соответствующий испытаниям эталона, появляется раньше у краев концентратора напряжений. Разделив нагрузку, соответствующую данному цвету эталона или модели на площадь поперечного сечения эталона или модели, находим среднее напряжение в моделях напряжение в поперечном сечении эталона:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}, \quad \sigma_M = \frac{F}{A_M}.$$

Таблица 6.1

Эскиз	$A,$ $m^2$	$F,$ $H$	$\sigma,$ $MПа$	$a$

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение теоретического коэффициента концентрации напряжений.
2. Опишите принципиальную схему установки для экспериментального определения коэффициента концентрации напряжений поляризационно-оптическим методом.
3. Из каких материалов изготавливаются исследуемые модели. Какими свойствами эти материалы обладают?
4. Как определялись экспериментальные значения коэффициентов концентрации напряжений?
5. Как влияет радиус кривизны отверстия на величину коэффициента концентрации напряжений?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### Определение ударной вязкости материалов

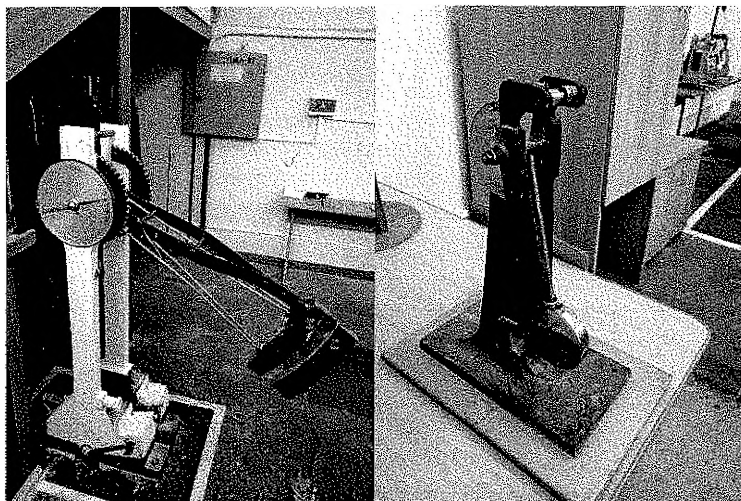
**Цель работы:** определить ударную вязкость стали при динамическом изгибе образцов с надрезом.

#### Содержание работы

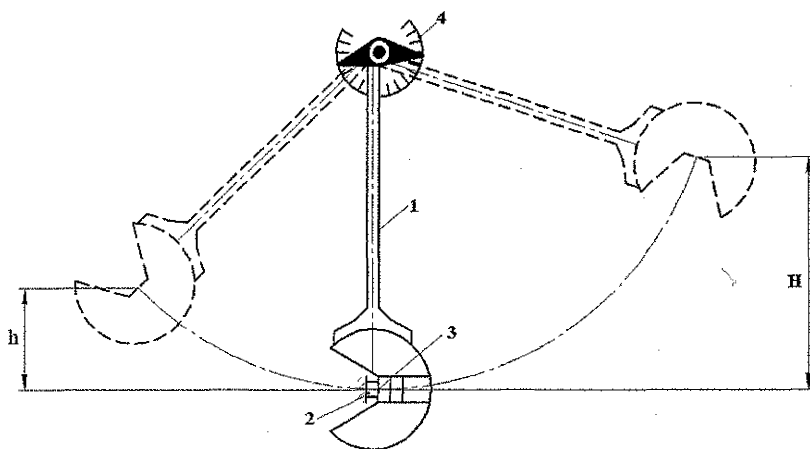
В инженерной практике часто приходится встречаться с динамической нагрузкой, которая сравнительно быстро меняет свою величину и положение. Динамическое действие нагрузки не ограничивается тем, что напряжения оказываются иными, чем при статических нагрузках. Сам материал иначе реагирует на

динамическую нагрузку, чем на медленно возрастающую. Особенно это заметно при ударе, когда резко повышается предел текучести. Поэтому при выборе материала для деталей подвергающихся динамическим воздействиям, вводят так называемую ударную пробу. Наиболее распространена проба на удар при изгибе.

Для определения ударной вязкости материалов наибольшее распространение получили маятниковые копры. Схема установки показана на рисунке 7.1.



*Рисунок 7.1 – Установка для определения ударной вязкости*



1 – маятник, 2 – образец, 3 – боек, 4 – шкала измерений

*Рисунок 7.2 – Схема установки для определения ударной вязкости*

При испытании стандартных образцов (рисунок 7.3) применяют маятниковые копры с запасом энергии не более 30 Дж. В нашем случае испытания производятся на маятниковом копре МК-30А. Согласно ГОСТ 9454-60, образцы



должны иметь стандартные размеры и установленный для образца надрез (рисунок 7.3).

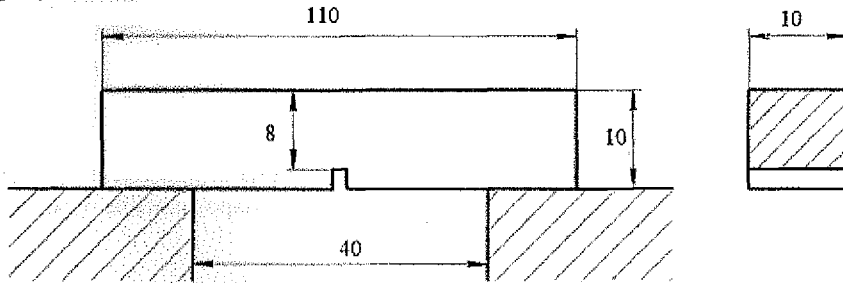


Рисунок 7.3 – Размеры образца для испытаний

Если количество энергии, затраченной на излом образца равно  $U$ , а площадь поперечного сечения образца в месте излома равна  $A$ , то величина ударной вязкости определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{U}{A}. \quad (7.1)$$

Смысл надреза заключается в том, что стараются поставить материал в наиболее тяжёлые условия работы в отношении ударных нагрузок. Возникающие при этом местные напряжения представляют собой такую систему напряжений, при которой материал находится в объёмном напряженном состоянии; в этом случае затрудняются пластические деформации, а материал вблизи дна надреза оказывается в хрупком состоянии.

### Порядок проведения испытаний

1. Перед началом испытания образец подвергается тщательному внешнему осмотру.
2. При помощи штангенциркуля измеряются размеры поперечного сечения образца ослабленном сечении.
3. Поднимают маятник копра на высоту  $H$  и по шкале измерительного прибора фиксируют запас потенциальной энергии  $U_n$ .
4. Устанавливают образец между опорами копра надрезом в сторону, противоположную ударяемой.
5. Наносят удар и фиксируют запас потенциальной энергии после разрушения  $U_k$ .

### Обработка результатов испытания

1. Вычисляют площадь поперечного сечения образца в ослабленном сечении  $A$ .
2. Находят количество энергии, затраченной на излом  $U = U_n - U_k$ .
3. По формуле (7.1) находят коэффициент ударной вязкости материала.
4. По таблице 7.1 определяют % содержания углерода и делают вывод о пластических свойствах стали.

### Контрольные вопросы

1. Что называется ударной вязкостью материала?
2. В чем состоит особенность поведения материалов при ударных нагрузках?
3. Опишите установку для испытания на ударную вязкость.
4. Что характеризует ударная вязкость для испытания сталей?
5. Опишите стандартный образец для испытаний и с какой целью делается надрез?
6. Что опаснее для сталей – повышение температуры в плюсовую сторону или понижение ниже нуля с точки зрения их сопротивления ударным нагрузкам?

Таблица 7.1

Содержание углерода в углеродистой стали, (%)	Термическая обработка			
	Отжиг		Закалка и отпуск	
	$\sigma_s$ , МПа	$\alpha$	$\sigma_s$ , МПа	$\alpha$
$C < 0,15$	350 – 450	$>25$	360 – 500	$>25$
$C = 0,15 - 0,20$	400 – 500	$>22$	450 – 650	$>20$
$C = 0,20 - 0,30$	500 – 600	$>20$	550 – 750	$>15$
$C = 0,30 - 0,40$	600 – 700	$>16$	700 – 850	$>12$
$C = 0,40 - 0,50$	700 – 800	$>12$	800 – 950	$>9$
$C = 0,50 - 0,60$	800 – 900	$>10$	900 – 1050	$>5$
$C = 0,60 - 0,70$	850 – 950	$>8$	$>100$	$>3$
$C > 0,70$	$>950$	$>6$	$>1050$	$>2$

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

*Онысько Сергей Романович  
Томашев Игорь Геннадьевич  
Веремейчик Андрей Иванович*

# **СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

для студентов специальностей  
мáшиностроительного и строительного профиля

**Часть I**

*Текст печатается в авторской редакции, орфографии и пунктуации*

Ответственный за выпуск: Онысько С.Р.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная верстка: Боровикова Е.А.

---

Подписано к печати 21.12.2020 г. Бумага «Снегурочка».

Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 2,1. Уч. изд. л. 2,25.

Заказ № 1205. Тираж 22 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».

4017, г. Брест, ул. Московская, 267.