



Негосударственное частное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Технический университет УГМК»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

<b>Специальность</b>	<u>21.05.04 Горное дело</u>
<b>Специализация</b>	<u>Подземная разработка рудных месторождений</u>
<b>Уровень высшего образования</b>	<u>Специалитет</u> <i>(бакалавриат, специалитет, магистратура)</i>
<b>Квалификация выпускника</b>	<u>горный инженер (специалист)</u>

Автор - разработчик: Зубов В.В., канд. техн. наук, доцент

Рассмотрено на заседании кафедры механики и автоматизации технологических процессов и производств

Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма  
2021

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучить поведение материала при растяжении до разрушения; получить диаграмму растяжения и определить основные механические характеристики материала образца.

### Теоретическое обоснование

Испытание на растяжение является основным видом испытания металлических материалов, так как при этом наиболее достоверно определяются механические характеристики прочности и пластичности (одноосное напряжённое состояние).

### Форма стандартных образцов

#### Цилиндрические образцы

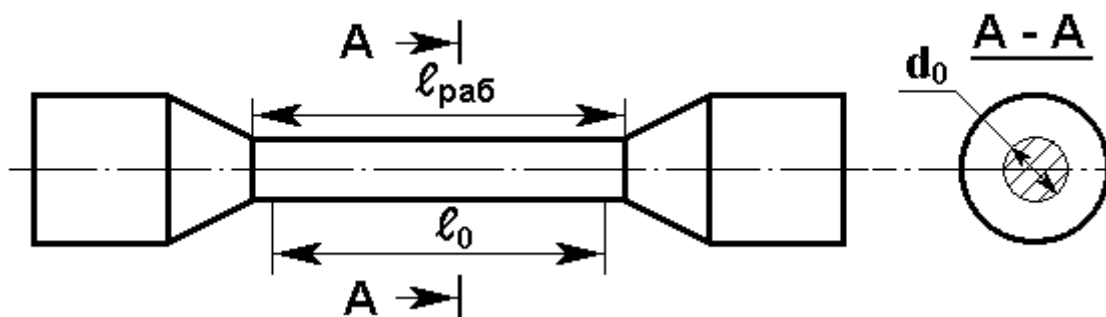


Рисунок 11

$$\text{от } l_{раб} = l_0 + 0,5l_0$$

$$\text{до } l_{раб} = l_0 + 2l_0.$$

где  $l_{раб}$  – длина цилиндрической части образца;  
 $l_0$  – длина расчётной части образца (на образце наносятся риски, ограничивающие длину расчётной части для исключения влияния закрепления головок в захватах разрывной машины).

Применяют образцы  $d_0 = 3$  мм и более. Образцы диаметром  $d_0 = 10$  мм и  $d_0 = 20$  мм называются нормальными.

При  $\frac{\lambda_0}{d_0} = 10$  - образцы называются длинными,

при  $\frac{\lambda_0}{d_0} = 5$  - образцы называются короткими.

#### Плоские образцы

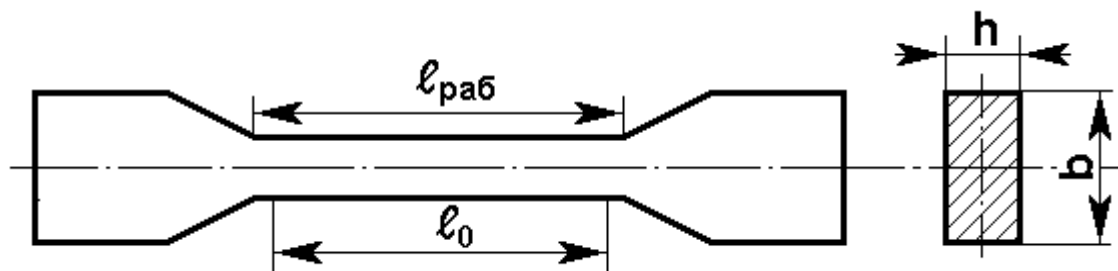


Рисунок 12

Плоские образцы применяются с отношением  $\frac{b}{h} = 3$ , при  $h = 0,5$  мм и более.

При  $h = 4$  мм – нормальные образцы.

### Механические характеристики материала

- 1 предел текучести -  $\sigma_T$ ;
- 2 предел прочности -  $\sigma_B$ ;
- 3 напряжение при разрыве -  $S_K$ ;
- 4 относительное остаточное удлинение при разрыве -  $\delta$ ;
- 5 удельная работа -  $U$ , затрачиваемая на разрыв образца;
- 6 относительное сужение в шейке –  $\psi$ .

### Диаграмма растяжения

Характер диаграммы растяжения зависит от свойств испытуемого материала, и для различных материалов эти диаграммы значительно отличаются друг от друга.

На рисунке 13 приведена диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали, вычерченная диаграммным прибором разрывной машины. Диаграмма вычерчена в координатах  $F, \Delta l$  за время испытаний, начиная с приложения нагрузки и кончая его разрушением.

$F$  – растягивающая сила;

$\Delta l_{\text{полн}}$  – абсолютное удлинение.

Начальный горизонтальный и криволинейный участок диаграммы является результатом незначительного смятия головок образца в местах их соприкосновения с захватом и устранением различных зазоров в механизме машины. Этот участок диаграммы не связан с деформацией самого образца и его исключают, принимая за начало координат диаграммы точку  $O$  пересечения продолжения прямолинейного участка диаграммы с осью абсцисс.

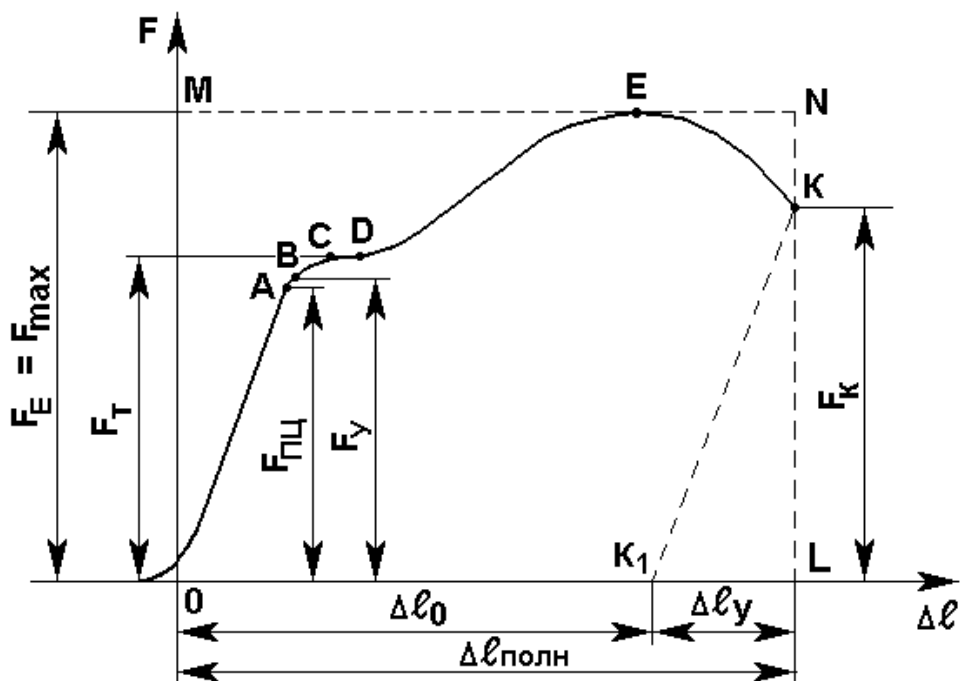


Рисунок 13

Отметим характерные для диаграммы растяжения участки и точки.

Первый участок изображается прямой наклонной линией OA, На этом участке связь между растягивающей силой  $F$  и деформацией  $\Delta \ell$  подчиняется закону Гука, то есть нагрузка возрастает пропорционально удлинению. Деформация на этом участке является упругой и носит обратимый характер, а удлинения оказываются очень малыми и полностью исчезают после снятия нагрузки. Нагрузка на диаграмме обозначена через  $F_{пц}$  и используется для вычисления предела пропорциональности

$$\sigma_{пц} = \frac{F_{пц}}{A_0}$$

Пределом пропорциональности  $\sigma_{пц}$  называется наибольшее напряжение, до которого существует прямопропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией.

Зона OA называют зоной упругости. Здесь возникают только упругие, очень незначительные деформации. Данные, характеризующие эту зону, позволяют определить значение модуля упругости  $E$ .

После достижения предела пропорциональности деформации начинают расти быстрее, чем нагрузка и диаграмма становится криволинейной. На этом участке в непосредственной близости от точки A находится точка B, соответствующая пределу упругости.

Пределом упругости называют максимальное напряжение, при котором в материале не обнаруживаются признаков пластической (остаточной) деформации.

Предел упругости характеризует начало перехода от упругой деформации к пластической.

У большинства материалов значения предела упругости и предела пропорциональности незначительно отличаются друг от друга. Поэтому обычно считают, что они практически совпадают.

При дальнейшем нагружении криволинейная часть диаграммы переходит в почти горизонтальный участок CD – площадку текучести. Здесь деформации растут практически без увеличения нагрузки. Нагрузка  $F_T$ , соответствующая площадке текучести используется при определении физического предела текучести.

Физическим пределом текучести  $\sigma_T$  называется наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

Зону BD называют зоной общей текучести. В этой зоне значительно развиваются пластические деформации. При этом у образца повышается температура, изменяются электропроводность и магнитные свойства.

Участок DE называют зоной упрочнения. После площадки текучести за точкой D материал вновь приобретает способность сопротивляться нагрузке, и для дальнейшей деформации образца необходимо новое увеличение нагрузки. Точка E соответствует достижению наибольшего значения нагрузки  $F_{max}$ . До этого образец удлиняется почти равномерно по исследуемой длине с увеличением длины образца от первоначальной  $\ell_0$  до  $\ell_{01}$ ; диаметр, наоборот, равномерно уменьшается от первоначального  $d_0$  до  $d_k$ . Следовательно, при равномерном растяжении по длине, сопротивление деформированию повышается вследствие деформационного упрочнения материала; одновременно происходит уменьшение сечения образца, ослабляющее сопротивление растяжению. Наблюдаемое фактически повышение сопротивления образца растяжению по кривой DE свидетельствует о том, что деформационное упрочнение материала при равномерном растяжении происходит интенсивнее, чем уменьшение площади поперечного сечения. Возрастание нагрузки прекращается, когда деформационное упрочнение материала перестаёт возмещать геометрическое ослабление, вызванное уменьшением сечения образца.

В конце этого участка в одном из сечений образца начинает образовываться местное сужение, так называемая «шейка». Место образования шейки по длине образца заранее предугадать нельзя.

Максимальная нагрузка, определяемая ординатой  $F_{\max}$  точки E диаграммы, называется нагрузкой, соответствующей пределу прочности.

Четвёртый участок диаграммы ЕК. После достижения наибольшей нагрузки, дальнейшее пластическое деформирование сосредоточивается на небольшом участке длины образца, вследствие чего образуется шейка с интенсивным сужением площади поперечного сечения.

По причине сужения, сопротивление образца растяжению постепенно уменьшается по кривой ЕК, до конечной нагрузки  $F_K$  при которой происходит разрыв образца. Ордината точки К даёт величину разрушающей нагрузки  $F_K$ .

После разрушения образца для определения его длины  $l_K$  обе его части тщательно прикладывают друг к другу и измеряют расстояние между точками, определяющими границы расчётной длины  $l_0$ .

Следует отметить, что в этом случае упругие деформации образца полностью исчезли и остались только пластические деформации.

Абсолютное удлинение образца

$$\Delta l_{\text{ост}} = l_K - l_0$$

Полученное значение абсолютного удлинения образца должно быть равным  $\Delta l_{\text{ост}}$  измеренным на диаграмме растяжения. В свою очередь  $\Delta l_{\text{ост}}$  равно сумме равномерного удлинения образца ( $\Delta l_{\text{равн}}$ ) и удлинения за счёт локальной деформации в зоне шейки ( $\Delta l_{\text{ш}}$ )

$$\Delta l_{\text{ост}} = \Delta l_{\text{равн}} + \Delta l_{\text{ш}}$$

Далее на оси абсцисс диаграммы измеряется полное удлинение образца, как суммы остаточной и упругой деформации

$$\Delta l_{\text{полн}} = \Delta l_{\text{ост}} + \Delta l_{\text{упр}}$$

После разрушения образца его диаметр в шейке измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднеарифметическому значению  $d_K$  вычисляют площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (шейке)  $F_K$ .

С рабочей диаграммы берутся значения нагрузок, соответствующих пределу пропорциональности, пределу упругости, пределу прочности, нагрузке в момент разрыва, величине остаточной и упругой абсолютной деформации и вычисляются характеристики прочности и пластичности.

### Характеристики прочности

Пределом текучести  $\sigma_T$  называют напряжение, при котором происходит рост деформаций без увеличения нагрузки.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0}$$

где  $A_0$  – первоначальная площадь образца.

Высокоуглеродистые и легированные стали, алюминиевые сплавы, бронза не дают предела текучести и для них устанавливается так называемый условный предел текучести.

Условным пределом текучести называют напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% (рисунок 14) от расчётной длины образца.

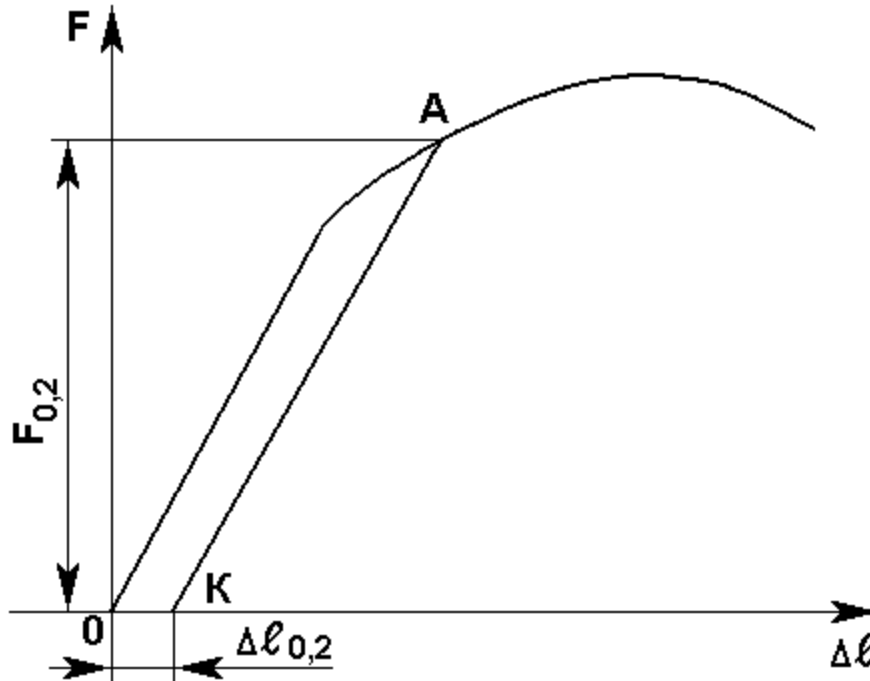


Рисунок 14

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}$$

где АК – прямая, параллельная первоначальной прямой диаграммы.

Для определения нагрузки  $F_{0,2}$  по оси абсцисс откладывают величину остаточного удлинения  $OK = 0,002 \ell_0$  (в масштабе удлинений). Из точки А проводят прямую параллельную прямолинейному участку диаграммы. Точка А определит  $F_{0,2}$ ; величина  $\Delta \ell_{0,2}$  обычно мала. После стадии текучести материал вновь начинает сопротивляться возрастающей нагрузке – наступает стадия упрочнения (рисунок 13) – участок ВС.

Пределом прочности  $\sigma_B$  называют частное от деления максимальной нагрузки –  $F_B$  на первоначальную площадь сечения образца. К моменту разрыва нагрузка уменьшается (участок СД), за счёт образования шейки – местного сужения площади поперечного сечения и наступает разрыв.

Напряжение при разрыве (истинное)

$$S_K = \frac{F_K}{A_1}$$

где  $F_K$  – нагрузка, соответствующая разрыву образца;  
 $A_1$  – площадь сечения шейки в месте разрыва.

### Характеристики пластичности

Относительное остаточное удлинение при разрыве является важной характеристикой пластичности материала.

$$\sigma = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100\%$$

где  $\ell_0$  – первоначальная расчётная длина образца;  
 $\ell_1$  – расчётная длина образца после разрыва. Она измеряется после стыковки двух частей разорванного образца.

Для СТ 3 –  $\sigma \geq 21\%$ . Для высокопрочных сталей  $7 \div 10\%$ . Для малоуглеродистой стали коэффициент полноты диаграммы можно принимать  $\nu = 0,85$ .

Полная работа, затраченная на разрыв образца, отнесённая к единице его объёма, называется удельной работой разрыва.

$$U = \frac{W}{V}$$

Обычно расчёт работы ведётся на расчётной длине образца -  $\ell_0$

$$U = \frac{W_{расч}}{V_{расч}}; \quad W_{расч} = F_{max} \cdot \Delta\lambda \cdot \nu;$$

где  $\Delta\ell$  - определяется непосредственным измерением.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством машины на которой будут производиться испытания (Р-5 или УГ-20). Записать тип машины, цену деления шкалы силоизмерительного устройства, масштаб записи диаграммы по нагрузке и удлинению.
2. Измерить диаметр образца  $d_0$  (размеры  $h$  и  $b$ , если он плоский) и рабочую длину  $\ell_{раб}$ , отмеченную на образце рисками.

Эскиз и размеры образца до испытания занести в таблицу 1.

Таблица 1

Эскиз образца					
d, мм	$\ell_0$ , мм	$\ell$ , мм	h, мм	h <sub>1</sub> , мм	A <sub>02</sub> , мм
Предполагаемый Материал					

3. Закрепить образец в захватах машины.
4. Проверить работу диаграммного аппарата и записать ось деформаций на диаграммной ленте.
5. Дать нагрузку и наблюдать за процессом растяжения образца и записью диаграммы.
6. После разрушения образца вынуть из захватов машины обе его части. Отключить электроэнергию.
7. Записать значение наибольшей нагрузки –  $F_{max}$  по шкале силоизмерительного устройства.
8. Снять с барабана бумагу с диаграммой растяжения образца и приступить к обработке результатов испытания.

### Обработка результатов испытания

1. Обе части разрушенного образца (рисунок 15) сложить вместе, измерить расстояние между рисками -  $\ell_1$  и диаметр образца в месте разрыва. Так как в месте разрыва поперечное сечение образца может иметь неправильную форму, то следует произвести измерение диаметра по двум взаимно перпендикулярным направлениям и по среднему арифметическому, определить площадь поперечного сечения  $A_1$ .

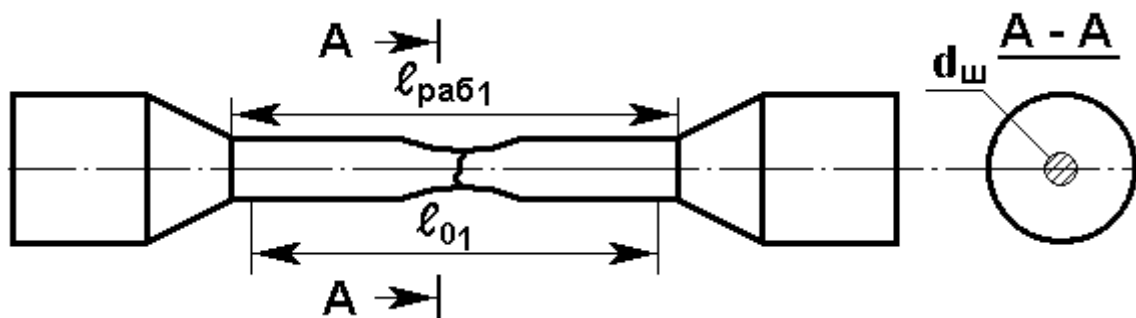


Рисунок 15

Эскиз и размеры образца после испытания занести в таблицу 2.

Таблица 2

Эскиз образца					
$d_{ш}$ , мм	$\ell_{01}$ , мм	$\ell_{p1}$ , мм	$h$ , мм	$h_1$ , мм	$A_{ш}$ , мм

Построить диаграмму растяжения, полученную на испытательной машине в масштабе (рисунок 16)

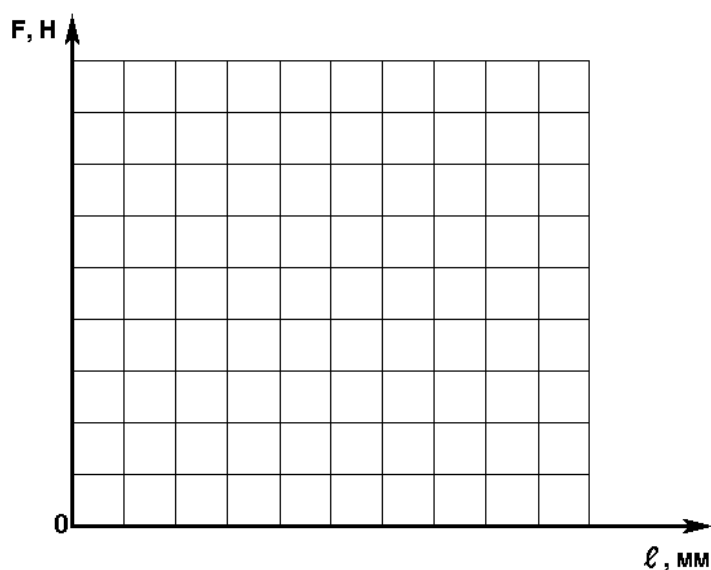


Рисунок 16



2. Произвести обработку диаграммы растяжения. Нанести координатные оси, исключив начальный криволинейный участок диаграммы, который возникает вследствие первоначального обжатия головок образца.

3. Отметить на диаграмме характерные точки в соответствии с рисунком 15.

4. Определить  $F_T, F_B, F_K$  по диаграмме с учётом масштаба сил диаграммы:  $\mu_F \left[ \frac{H}{мм} \right]$ ;  $F_B$  –

должна совпадать с нагрузкой, отмеченной по шкале силоизмерительного устройства.

5. Вычислить характеристики прочности

а) предел текучести

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0} [МПа]; \quad F_T [H];$$

где  $A_0$  (мм<sup>2</sup>) – первоначальная площадь сечения образца.

При отсутствии площадки текучести определить условный предел текучести (рисунок 14)

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0} [МПа];$$

б) предел прочности

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0} [МПа];$$

в) напряжение при разрыве

$$S_K = \frac{F_K}{A_1}$$

где  $A_1$  (мм<sup>2</sup>) – площадь сечения образца в месте разрыва.

6. Вычислить характеристики пластичности

а) относительное остаточное удлинение при разрыве

$$\delta = \frac{\lambda_{01} - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100\%;$$

б) относительное остаточное сужение

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

7. Определить удельную работу, затраченную на разрыв образца

$$U = \frac{W_{\text{расч}}}{V_{\text{расч}}} \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}^3} \right] \quad W_{\text{расч}} = F_B \cdot \Delta l \cdot \nu; \quad V_{\text{расч}} = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot l_0}{4};$$

где  $\Delta l = l_1 - l_0$ ;  $\nu = 0,85$ ;

Относительное остаточное сужение при разрыве является второй характеристикой пластичности материала

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

где  $A_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения;  
 $A_1$  – площадь поперечного сечения в наиболее тонком месте шейки после разрыва.

Для СТ 3 –  $\psi = 50 \div 60\%$ .

$\Psi$  более точно характеризует пластичность, чем  $\delta$ , но  $\Psi$  можно определить только для материалов, которые образуют шейку при разрыве; поэтому  $\delta$  является основной характеристикой пластичности. Чем больше  $\delta$  тем пластичнее материал. К числу весьма пластичных материалов относятся: медь, алюминий, латунь, малоуглеродистые стали и др. К слабопластичным – большинство легированных сталей. К хрупким материалам относятся: чугун, высокоуглеродистая инструментальная сталь, камень, бетон, стекло, стеклопластики и др.

Следует помнить, что деление материалов на пластичные и хрупкие условно, так как в зависимости от условий испытаний (скорость нагружения, температура) и вида напряжённого состояния хрупкие материалы способны вести себя как пластичные, а пластичные – как хрупкие.

Характеристики пластичности непосредственно не учитываются при расчётах на прочность, но учитываются при определении допускаемых напряжений в части выбора механических характеристик. Если определяется допускаемое напряжение для пластичных материалов, то предельным напряжением является –  $\sigma_T$ , для хрупких и малопластичных –  $\sigma_{02}$ .

Следует также помнить, что хрупкие материалы весьма склонны к концентрации напряжений.

### Удельная работа, затрачиваемая на разрыв образца

Площадь диаграмм, заключённая между кривой ОАК (рис. 13) и осью абсцисс, представляет собой работу, затраченную на разрыв образца. Пусть, например, площадь диаграммы, замеренная планиметром, равна  $W$ , а площадь описанного прямоугольника

OMNL равна  $W' = F_{\text{max}} \cdot \Delta l_{\text{полн}}$ , где  $\Delta l_{\text{полн}} = OL$ . Обозначим  $\frac{W}{W'} = \nu$  - коэффициент

полноты диаграммы. Тогда работа, затраченная на разрыв образца:  $W = F_{\text{max}} \cdot \Delta l_{\text{полн}} \cdot \nu$ .

### Вопросы для самоподготовки

1. Для чего предназначены механические испытания материалов?
2. Какие механические характеристики получают в данной работе?
3. Какая разница между истинной и условной диаграммами растяжения?

4. Какой вид имеет диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали, чугуна, меди и алюминия?
5. Охарактеризуйте упругую стадию деформирования. Какие деформации называются упругими, остаточными?
6. Дайте определение текучести материала. Как определить долю упругих и остаточных деформаций образца?
7. Дайте определение предела пропорциональности, предела текучести, предела прочности. Покажите на диаграмме момент образования шейки на образце.
8. Какие материалы называются пластичными, хрупкими?
9. Какие механические характеристики используют для установления допустимых напряжений для пластичных и хрупких материалов?
10. Как определить по диаграмме длину образца после испытания?
11. Как определяют продольную деформацию (абсолютную и относительную) при растяжении?
12. Как определяют поперечную деформацию при растяжении?
13. Что называется жёсткостью сечения при растяжении?
14. Какое напряжение называют предельным или опасным?
15. Какие напряжения принимают за предельные для пластичных материалов, для хрупких материалов?
16. Какое напряжение называют допустимым? Как определяют допустимое напряжение?
17. Дайте определение условия прочности при растяжении.
18. Как определяют фактический коэффициент запаса прочности?
19. Как разгрузить из любой точки диаграмму и выделить полную деформацию, упругую и остаточную?
20. Что называют наклёпом?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2**

### **ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ И ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** ознакомиться с методами испытания материалов на сжатие, определить механические характеристики пластичных и хрупких материалов при сжатии.

#### **Теоретическое обоснование**

При испытании на сжатие пластичных материалов (малоуглеродистой стали, меди и др.) из-за сильной деформации (сплющивания) удаётся определить лишь предел текучести; практически они не могут быть разрушены, поэтому для пластичных материалов не существует предела прочности при сжатии. Хрупкие материалы (чугун, камень, бетон и др.) разрушаются при сжатии, выдерживая при этом, значительно большие напряжения, чем при растяжении. Для этих материалов испытание на сжатие является основным, так как детали из хрупких материалов обычно в реальных конструкциях работают на сжатие.

#### **Испытательная машина**

Испытания проводятся на машинах любой конструкции, работающих на сжатие и соответствующих требованиям ГОСТ 7855-68.

На рисунке 17 дано устройство и описание работы универсальной гидравлической машины для испытания на растяжение, сжатие, изгиб и срез с максимальной нагрузкой на образец 1000 кН.

Машина состоит из двух основных частей: пульта управления и рабочей части.

В качестве нагнетаемой жидкости используется масло. Последнее из масляного бака 1 при помощи шестерёнчатого насоса подаётся в многоступенчатый поршневой насос высокого давления и через пропускную колонку 2 по маслопроводу 3 подаётся в главный цилиндр 4. Регулировка скорости подачи масла, а следовательно, и скорости нагружения образца, производят поворотом маховичка 5, воздействующего на тройной клапан, который служит для соединения главного цилиндра либо с маслопроводом высокого давления для нагрузки, либо с резервуаром для разгрузки обратного хода.

Нагрузочные скорости указаны на шкале 6 под маховичком. Шкала градуирована для скорости в миллиметрах в минуту, а регулировка скоростей бесступенчатая.

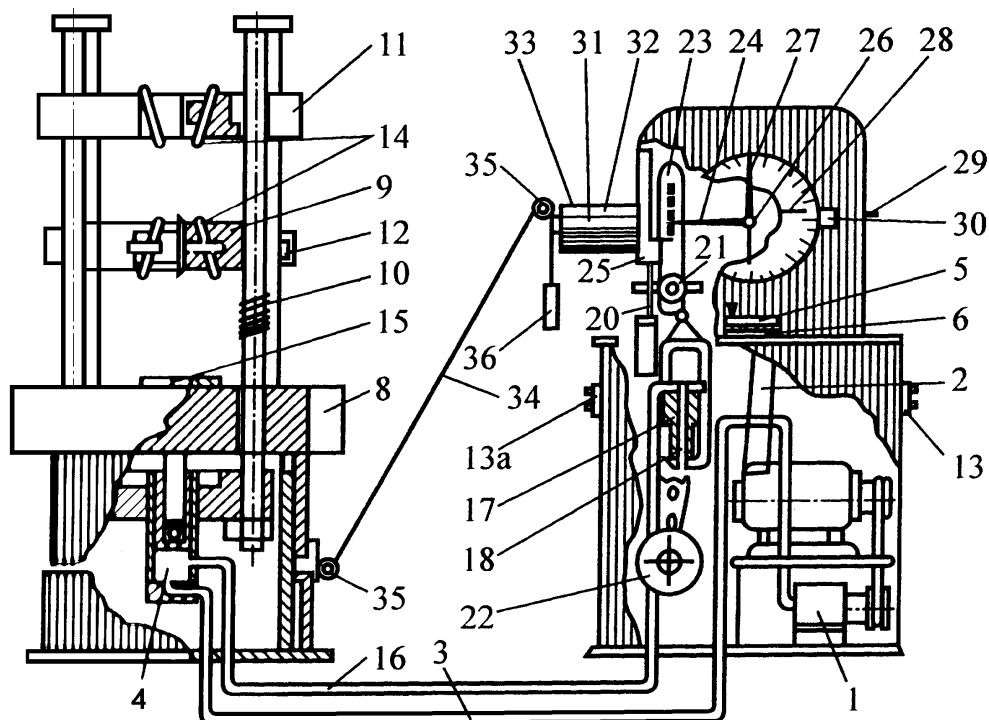


Рисунок 17

Один оборот маховичка перекрывает весь диапазон гидравлического действия: регулировочная скорость, нагрузочная скорость, нуль, разгрузка, быстрый обратный ход.

Масло, попав в нижний цилиндр, выталкивает плунжер, поднимающий стол 8.

Нижняя траверса 9 укреплена на колоннах 10 и в процессе испытания остаётся неподвижной. При испытании расстояние между верхней 11 и нижней траверсами регулируют в зависимости от размеров образца опусканием или поднятием нижней траверсы с помощью электродвигателя, укреплённого на нижней траверсе, через цепную и червячную 12 передачи. Пуск электродвигателя осуществляют от кнопочной станции 13, расположенной с правой стороны насосной установки, а перемена хода электродвигателя – от кнопочной станции 13а, расположенной слева.

Образец, подвергающийся испытанию на растяжение, помещают в клиновых самоосвобождающихся захватах 14, закреплённых в верхней и нижней траверсах. Клиновые захваты на внутренней поверхности имеют насечку и плоский или круглый профиль в зависимости от профиля испытуемого образца. Проскальзывание образца исключается, так как по мере увеличения растягивающей силы увеличивается и сила обжатия образца захватами.

Для проведения испытаний на сжатие на середине стола устанавливают опорную плиту 15, а к нижней плоскости траверсы прикрепляют нажимную плиту Образец, помещённый между неподвижной траверсой и подвижным столом, подвергают сжатию.

### **Силоизмерительный механизм**

Контроль за величиной нагрузки и измерение деформации образца производят следующим образом.

Из главного цилиндра по маслопроводу 16 масло поступает на пульт управления в измерительный цилиндр 17. Давлением масла из цилиндра выталкивается плунжер 18, связанный со стальной лентой. Лента переброшена через блок 20, расположенный на оси маятника 21. К концу маятника подвешиваются съёмные грузы 22, условный вес которых определяется в зависимости от требуемой максимальной нагрузки. Натяжение стальной ленты под нагрузкой заставляет маятник отклоняться от положения равновесия. При этом верхнее плечо 23 маятника, входящее в корпус шкалы, перемещает зубчатую рейку 24 индикатора, скользящую по ролику 25 и входящую в зацепление с шестерёнкой 26, укрепленной на одной оси с подвижной и неподвижной стрелками 27 и 28. При своём движении рейка поворачивает шестерню, вместе с которой поворачивается подвижная стрелка 27. Движение второй стрелки 28 принудительно связано с перемещением подвижной стрелки. При разрушении образца и падении нагрузки подвижная стрелка возвращается в исходное нулевое положение, а неподвижная стрелка остаётся на месте, фиксируя максимальную нагрузку.

В зависимости от величины требуемой или ожидаемой нагрузки для повышения точности отсчётов, индикатор испытательной машины имеет пять шкал, разбитых под одним и тем же градусом. Шкала имеет ряд окошек через которые видны цифры, расположенные на диске за градуированной шкалой. Для каждого предела шкалы имеется свой ряд цифр, который устанавливается поворотом рычага 29 снаружи шкалы; здесь же находится указатель 30 предела шкалы.

Настройка испытательной машины на определённую нагрузку производится до пуска машины и включает в себя установку грузов на маятнике в соответствии с принятым пределом шкалы.

При подвешивании грузов маятник отклоняют от вертикального положения наружу и опирают на утапливаемую в станине опору. После подвешивания грузов опору утапливают, и маятник возвращают в вертикальное положение.

### **Диаграммное устройство**

Испытательная машина позволяет производить автоматическую запись диаграммы испытания.

Самопишущий прибор механического типа вычерчивает кривую усилие-деформация и может быть использован при испытаниях на растяжение, сжатие и изгиб. Приспособление для записи диаграммы работает следующим образом. На хвостовой части зубчатой рейки 31, выходящей из пульта управления, закреплено записывающее перо 32. Здесь же прикреплен барабан 33. Так как движение рейки связано непосредственно с движением маятника, то запись величины нагрузки на диаграмме производится весьма точно.

Величина деформации образца связана с поднятием верхней траверсы и стола испытательной машины. К столу машины прикреплена нить 34, переброшенная через систему блоков 35 и один шкив барабана.

### **Форма и размеры образцов**

При испытании на сжатие используют образцы небольшой высоты (для исключения влияния изгиба), которые сжимают между плоскими плитами испытательной машины.

При сжатии образец из пластичных материалов приобретает бочкообразную форму из-за сил трения между торцами образца и опорными плитами, так как силы трения препятствуют слоям, близлежащим к опорам, расширяться в поперечном направлении. Влияние трения можно уменьшить путём смазки опорных поверхностей или применением образцов специальной формы. Для металлов применяют образцы цилиндрической формы (рисунок 18).

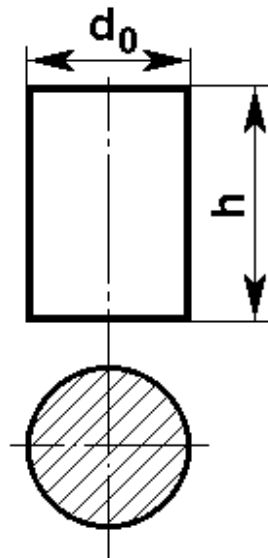


Рисунок 18

При испытании на сжатие дерева, цемента, бетона применяют образцы в виде куба. Размеры испытуемых образцов определяют в зависимости от предельной нагрузки, которую может обеспечить испытательная машина.

### Диаграмма сжатия, механические характеристики материала определяемые при сжатии

Испытание образцов из малоуглеродистой стали

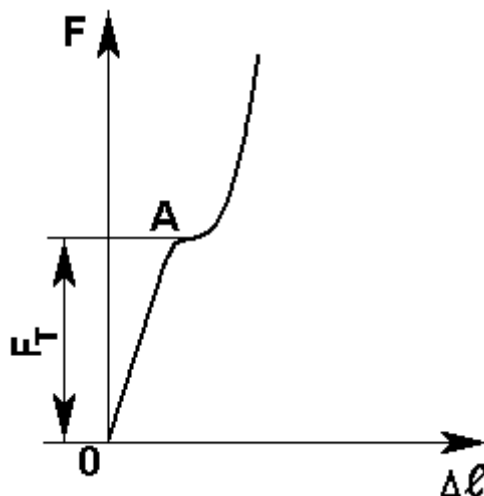


Рисунок 19

При испытании образцов из малоуглеродистой стали (пластичный материал) поперечные размеры образца при сжатии увеличиваются, а длина значительно уменьшается,

нарушения целостности образца не происходит. Из диаграммы (рисунок 19) видно, что в начальной стадии нагружения имеется пропорциональность между нагрузкой и деформацией (закон Гука), далее материал достигает предела текучести

$$\sigma_{\text{ТС}} = \frac{F_c}{A_0},$$

который, как правило, равен пределу текучести при испытаниях образца из того же материала на растяжение.

При дальнейшем нагружении рост деформации вначале увеличивается, затем замедляется вследствие увеличения сечения образца (сплющивания). Если не принять меры к ликвидации влияния трения на торцах образца, он приобретает бочкообразную форму (рисунок 20).

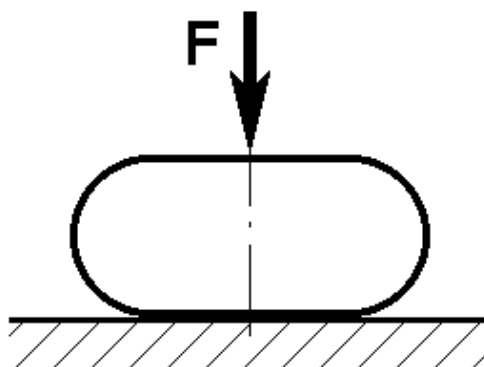


Рисунок 20

### Испытание образцов из чугуна

При испытании образцов из чугуна на сжатие определяют предел прочности, проведение этого испытания регламентируется ГОСТом.

Диаграмма сжатия чугуна не имеет отчётливо выраженного прямолинейного участка, а постепенно искривляясь, обрывается в момент разрушения образца (рисунок 21).

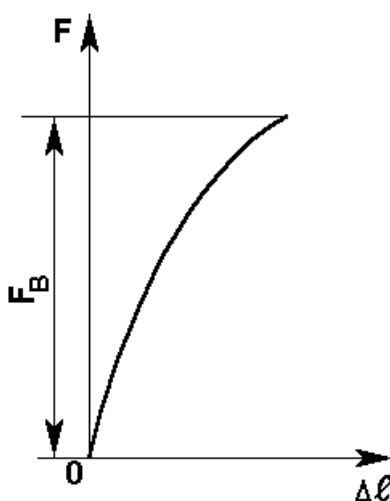


Рисунок 21

Предел прочности при сжатии

$$\sigma_{вс} = \frac{F_{вс}}{A_0}$$

где  $A_0$  – площадь поперечного сечения образца до испытаний.

Образец из чугуна разрушается по косой площадке под углом  $45^0 \div 50^0$  вследствие отрыва частиц и сдвига, то есть площадки сдвига приблизительно совпадают с площадками действия наибольших касательных напряжений при осевом нагружении (рисунок 22)

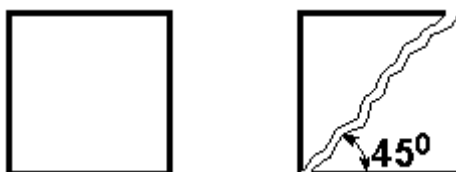


Рисунок 22

### Порядок выполнения работы

1. Записать в журнал тип испытательной машины (Р-5 или УГ-20), цену деления шкалы силоизмерительного устройства, масштаб записи диаграммы по оси нагрузок и по оси сжатия.
2. Измерить диаметр и высоту стального и чугунного образцов.

Эскиз и размеры образца до испытания занести в таблицу 3.

Таблица 3

Эскиз Образца		
h, мм	d, мм	A, мм <sup>2</sup>
Предполагаемый материал		

3. Установить один из образцов между опорными плитами машины.
4. Проверить работу диаграммного аппарата и записать ось деформаций на диаграммной ленте.
5. Дать нагрузку и наблюдать за процессом сжатия образца и записью диаграммы. Для пластичного образца, при достижении нагрузки близкой к предельной для данной испытательной машины, произвести разгрузку образца.  
Для хрупкого образца, по шкале силоизмерительного устройства зафиксировать наибольшую нагрузку  $F_B$  в момент разрушения.
6. Снять с барабана бумагу с диаграммой сжатия образца.
7. Провести испытание второго образца.

### Обработка результатов испытаний

1. Выполнить в журнале эскизы разрушенных образцов.
2. Произвести обработку диаграмм сжатия с определением  $\sigma_T$  для пластичного материала и  $\sigma_B$  – для хрупкого материала с учётом масштаба сил.



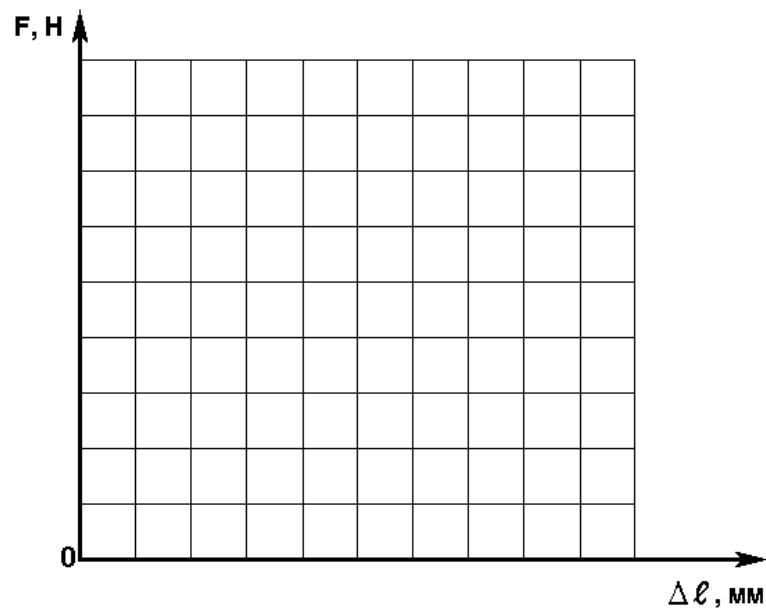


Рисунок 23

3. Вычислить характеристики прочности:

а) для пластичного материала – предел текучести:

$$\sigma_{ТС} = \frac{F_T}{A_0} [\text{МПа}]$$

где  $A_0$  (мм<sup>2</sup>) – площадь первоначального сечения образца.

б) для хрупкого материала – предел прочности:

$$\sigma_{ВС} = \frac{F_B}{A_0} [\text{МПа}]$$

### Вопросы для самоподготовки

1. Как определить величину нормальных напряжений в поперечном сечении сжатого образца?
2. Какие механические характеристики определяются при испытании на сжатие?
3. Почему при сжатии материала истинное напряжение в любой момент опыта будет меньше условного в тот же момент?
4. Как испытывают образцы из пластичного, хрупкого материала?
5. Какой вид имеет диаграмма сжатия пластичного и хрупкого материала? Сравните их с диаграммами растяжения.
6. Каков характер разрушения хрупкого материала? От чего он зависит?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Экспериментальное определение упругих характеристик материала: модуля продольной упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ . Ознакомление с методикой измерения деформаций электрическими тензометрами (датчиками сопротивления).

#### Основные теоретические положения

Определение характеристик упругости проводится при растяжении плоского образца. При этом напряжения и деформация распределены равномерно.

Для большинства материалов в начальной стадии нагружения имеет место прямопропорциональная зависимость между напряжениями и деформациями (закон Гука).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение, Па;  
 $\varepsilon$  – относительная продольная деформация;  
 $E$  – модуль продольной упругости, Па.

Из формулы (1) следует, что

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F_0}{A \cdot \varepsilon} = \frac{F \cdot \lambda}{A \cdot \Delta \lambda} \quad (2)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  
 $\ell$  – рабочая длина образца, м;  
 $\Delta \ell$  – абсолютное удлинение, м.

На диаграмме растяжения модуль упругости образца из стали (рисунок 24) равен тангенсу угла наклона прямой  $OA$  к оси  $\varepsilon$ .

Чем больше угол  $\alpha$ , тем меньше будет деформация при тех же напряжениях; тем более жёстким будет материал.

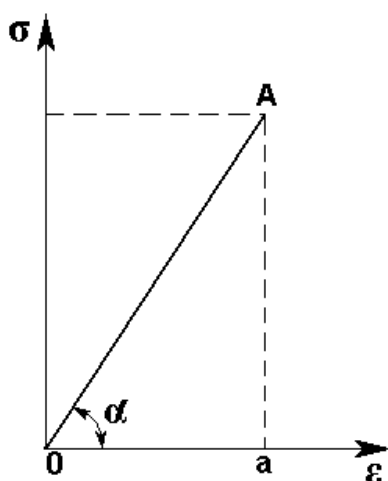


Рисунок 24

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\overline{Aa}}{ao} = tg\alpha$$

Модуль продольной упругости для каждого материала есть величина постоянная, характеризует жёсткость материала, то есть способность материала сопротивляться упругому деформированию – чем больше  $E$ , тем лучше материал сопротивляется деформированию, тем жёстче конструкция из этого материала.

При растягивании стержня кроме изменения продольных размеров (продольных деформаций) происходит изменение поперечных размеров (поперечные деформации). Отношение поперечной деформации  $\varepsilon'$  к продольной  $\varepsilon$  при простом растяжении или сжатии, взятое по абсолютной величине, называется коэффициентом Пуассона (коэффициентом поперечной деформации).

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$$

Коэффициент Пуассона – величина безразмерная, в пределах упругих деформаций для данного материала есть величина постоянная. Для различных изотропных материалов коэффициент Пуассона принимает значения  $0 \leq \mu \leq 0,5$ . Для стали коэффициент Пуассона равен  $0,25 \leq \mu \leq 0,35$ .

#### Постановка опыта

Для определения  $E$  и  $\mu$  испытания образца проводятся на машине «Эйвери».

Для замера деформаций к образцу приклеиваются тензодатчики сопротивления  $T_1$  и  $T_2$  (рисунок 25) в продольном и поперечном направлениях.

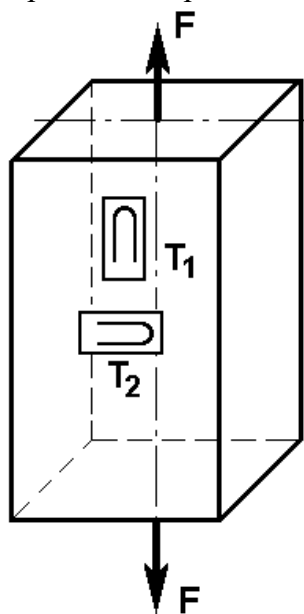


Рисунок 25

Проволочные датчики сопротивления (тензорезисторы) представляют собой петлевидные решётки из проволоки (константан, нихром и др.). Длина петель решётки называется базой (а) и составляет от 0,5 мм до 100 мм с сопротивлением (R) от 50 Ом до 200 Ом. Решётка 2

(рисунок 26) находится внутри изоляционных пластин из тонкой бумаги 3; выводы тензорезисторов припаивают к проводникам 1. Их наклеивают на поверхность испытываемого образца (детали) клеем циакрин ЭО, ВС-350 и др. Наклеенный тензорезистор

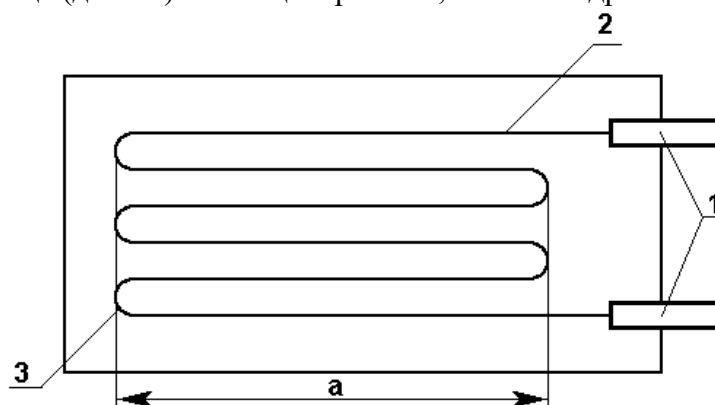


Рисунок 26

воспринимает деформацию растяжения (сжатия) её поверхности, при этом изменяется электрическое сопротивление тензорезистора. Величина изменения сопротивления  $\Delta R$  и служит для определения деформации.

Измерение показаний датчиков производится с помощью измерителя деформаций ИД-20 путём поочерёдного включения датчиков в мостовую схему. Деформации при этом определяются по формуле:

$$\Delta \varepsilon = \Delta n \cdot 10^{-5}$$

где  $\Delta n$  – приращения показаний датчиков.

### Порядок проведения опыта

1. Измерить поперечные размеры образца. Эскиз и размеры образца занести в таблицу 4.

Таблица 4

Эскиз Образца	
Размеры поперечного сечения образца, мм	
Ширина	Высота
Материал	

2. Установить образец в захватах машины.
3. Подключить датчики сопротивления к прибору ИД-10, включить прибор и прогреть 15 минут.
4. Проверить работоспособность прибора, для чего переключатель П1 установить в положение эталон нуля «ЭТО» и сбалансировать прибор переключателями П2 и П3 и реохордом «Настройка». Записать показания. Переключатель П1 поставить в положение «ТАР», при этом даётся разбаланс моста в 0,1 Ом. На шкале реохорда разница должна быть равной 417 единиц, в противном случае ручкой «КОЭФ» следует найти такое положение, при котором разбаланс моста в 0,1 Ома даёт необходимую разность по шкале реохорда.
5. Нагрузить образец начальным усилием  $F_0 = 300$  кг.
6. Снять начальные показания продольного и поперечного датчиков, подключив их поочерёдно к мосту переключателем П1 и сбалансировав переключателями П2, П3 и реохордом «Настройка».

7. Произвести ступенчатое нагружение образца ( $\Delta F = 300$  кг), фиксируя на каждой ступени показания датчиков в таблице наблюдений. Количество ступеней нагружения  $K = 4 \div 5$ .

Показания прибора и расчётные данные занести в таблицу 5.

Таблица 5

Расположение датчиков	Номер датчика	Показания приборов при различных нагрузках, Н						Приращение показаний						Среднее приращение показаний
		0	10	20	30	40	0	0	10	20	30	40	0	
Продольное	1													
	3													
	5													
	7													
Поперечное	2													
	4													
	6													
	8													

8. Разгрузить образец.

### Обработка результатов испытания

1. По приращению нагрузки  $\Delta F$  вычислить напряжение  $\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{A}$  и по среднему

приращению  $\Delta n_{np}^{cp}$  показаний датчика  $T_1$  вычислить удлинение  $\Delta\varepsilon_{np}^{cp}$ .

2. Вычислить модуль продольной упругости:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{np}^{cp}}$$

3. По найденным значениям  $\Delta n_{np}^{cp}$  и  $\Delta n_{non}^{cp}$  вычислить соответствующие деформации

$\Delta\varepsilon_{np}^{cp}$  и  $\Delta\varepsilon_{non}^{cp}$  и определить коэффициент Пуассона

$$\mu = \frac{\Delta\varepsilon_{non}^{cp}}{\Delta\varepsilon_{np}^{cp}}$$

### Вопросы для самоподготовки

1. Сформулируйте закон Гука для линейных деформаций.
2. Дайте определение модуля упругости первого рода. Какие свойства материала он характеризует?
3. Чем выражается модуль упругости первого рода на диаграмме растяжения?
4. Как экспериментально определяют модуль продольной упругости?
5. Дайте определение коэффициента Пуассона. Как он находится экспериментально?
6. Для чего предназначены тензодатчики? Опишите принцип их работы.
7. Перечислите оборудование, применяемое в работе.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** установить зависимость крутящего момента и угла поворота сечений при кручении и определить модуль сдвига.

#### Теоретическое обоснование

Для многих конструкционных материалов до известных пределов нагружения между касательными напряжениями  $\tau$  и углом сдвига  $\gamma$  существует линейная зависимость

$$\tau = G \cdot \gamma,$$

где  $G$  – модуль упругости 2-го рода или модуль сдвига. Характеризует способность материала сопротивляться деформациям сдвига;

Для определения угла сдвига рассмотрим вал, на который действует крутящий момент  $T$ . Для анализа распределения касательных напряжений по поперечному сечению вала мысленно выделим из вала цилиндр (рисунок 27), имеющий радиус  $\rho$  и длину  $dz$  и покажем на этом цилиндре угол сдвига  $\gamma$  и элементарный угол закручивания  $d\varphi$ .

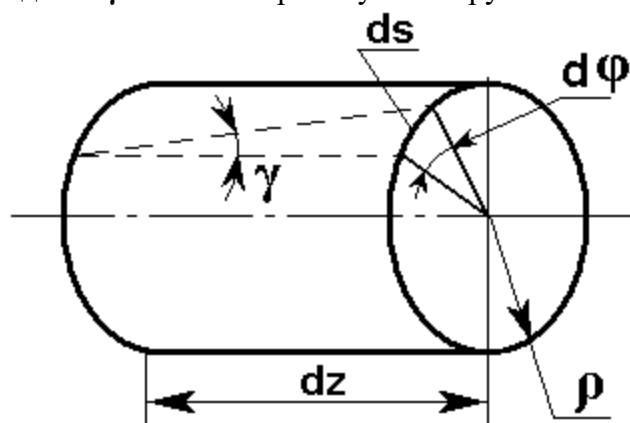


Рисунок 27

Из рисунка 27 видно, что длину дуги  $ds$ , лежащей на поверхности цилиндра можно найти двумя путями:

$$\left. \begin{aligned} ds &= \gamma \cdot dz \\ ds &= \rho \cdot d\varphi \end{aligned} \right\}$$

Отсюда

$$\gamma = \rho \cdot \frac{d\varphi}{dz}$$

На основании закона Гука при сдвиге

$$\tau = \frac{T}{J_\rho \cdot \rho},$$

где  $J_\rho$  – осевой момент инерции в полярных координатах.

Отсюда получим

Угол закручивания стержня круглого (кольцевого) сечения в пределах упругих деформаций связан с крутящим моментом линейной зависимостью (закон Гука).

$$\varphi = \frac{T \cdot \lambda}{J_p \cdot G}$$

где  $T$  - крутящий момент;

$\lambda$  - расстояние между сечениями, относительный (взаимный) угол поворота которых определяется;

$J_p$  - полярный момент инерции поперечного сечения;

$G$  - модуль сдвига.

Отсюда

$$G = \frac{T \cdot \lambda}{J_p \cdot \varphi} \quad (1)$$

Измерив опытным путём величину момента  $T$  и угол закручивания  $\varphi$  можно вычислить модуль сдвига  $G$ . Чтобы установить зависимость угла закручивания от крутящего момента, нагружение образца производят несколькими ступенями, причём крутящий момент при каждой ступени нагружения увеличивают на одну и ту же величину  $\Delta T$ . После каждого нагружения измеряют угол закручивания образца. Приращение угла закручивания на одну и ту же величину подтверждает наличие прямой пропорциональности между углами закручивания и крутящим моментом, т.е. справедливость закона Гука.

Величина ступени нагружения  $\Delta T$  зависит от материала образца и его диаметра; её следует выбирать таким образом, чтобы при испытании не возникли остаточные деформации образца.

### **Форма образца, средства нагружений и средства измерений**

Определение модуля сдвига будем производить на образце кольцевого сечения, размеры поперечного сечения которого указаны на рисунке 28. Образец устанавливаем в захваты машины КМ-50-1 со шкалой градуированной на кН·м.

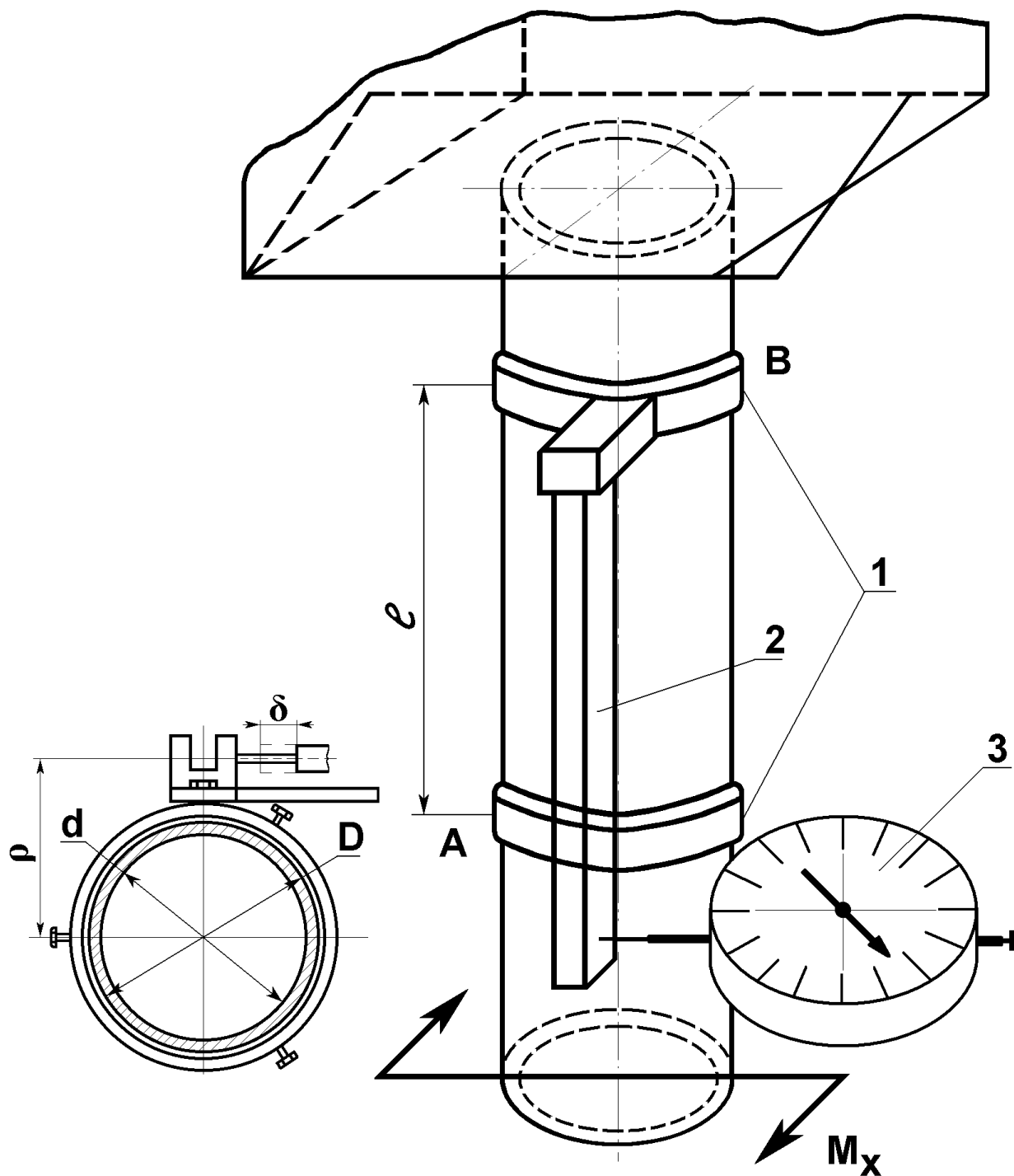


Рисунок 28

Измерение углов закручивания производится индикатором – 3 (рисунок 28), установленном на кронштейне - 1, который крепится неподвижно хомутом (сечение А) к образцу. На расстоянии  $\lambda$  (сечение В) крепится хомутом второй кронштейн с консолью и штангой, которая параллельна образующей образца (второй конец штанги не закреплён). В свободный конец штанги упирается игла индикатора. При закручивании образца моментом  $T$  индикатор поворачивается вместе с образцом. Таким образом, угол закручивания трубы -  $\varphi$  и показания индикатора зависят только от расстояния  $\lambda$  между хомутами (сечениями А и В). Дуга окружности радиуса -  $\rho$  равна  $\rho \cdot \varphi$ , но т.к. дуга мала её можно принять равной перемещению, которое показывает индикатор  $\delta = \rho \cdot \varphi$ , следовательно



$$\varphi = \frac{\delta}{\rho}$$

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством КМ-50-1 и приспособлением для определения угла закручивания на месте.
2. Установить образец в захват машины.
3. Произвести ступенчатое нагружение образца ( $\Delta T = 30 \text{ Нм}$ ) фиксируя на каждой ступени показания индикатора –  $n$  в таблице (количество ступеней нагружения  $K = 5$ ).
4. Разгрузить образец.

Данные испытания занести в таблицу 6.

Таблица 6

№ п/п	Крутящий момент, Нм	Показания индикатора, мм	Приращения показаний индикатора, мм	Среднее приращение показаний индикатора, мм
1	0			
2	30			
3	60			
4	90			
5	120			
6	150			
7	120			
8	90			
9	60			
10	30			
11	0			

### Обработка результатов измерения

1. Вычислить разность отсчётов по каждой ступени нагружения и определить среднее приращение показаний индикатора  $\Delta \delta_{cp} = \Delta n_{cp} \cdot 10^{-2} \text{ мм}$
2. Вычислить среднее приращение угла закручивания

$$\Delta \varphi_{cp} = \frac{\Delta \delta_{cp}}{\rho}; \quad \rho = 38,5 \text{ мм}$$

3. Вычислить модуль сдвига в соответствии с формулой (1)  
 $d = 27,5 \text{ мм}$

$$G = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{J_p \cdot \Delta \varphi_{cp}} [\text{МПа}] \quad D = 33,5 \text{ мм}$$

$$\lambda = 285 \text{ мм}$$

$$\Delta T = 30 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

4. Вычислить модуль сдвига по зависимости имея ввиду, что для стали:  
модуль упругости 1-го рода

$$E = (2 \div 2,2) \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$G_m = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$$

коэффициент Пуассона

$$\mu = 0,25 \div 0,35$$

5. Подсчитать процент расхождения между табличным и определённым опытным путём значениями модуля сдвига

$$K = \frac{G_T - G}{G_T} \cdot 100\%$$

### Вопросы для самоподготовки

1. Дайте определение деформации сдвига.
2. Физический смысл угла сдвига.
3. Сформулируйте закон Гука для сдвига.
4. Физический смысл модуля сдвига.
5. Как определяется деформация при испытаниях на кручение?
6. Какая связь существует между упругими постоянными материала?
7. Перечислите оборудование, применяемое в работе.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

### ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛА НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Изучить методику проведения испытания металлов на ударную вязкость; определить ударную вязкость материала.

#### Основные теоретические положения

Механические характеристики материала, полученные при статических испытаниях, не позволяют оценить его поведение при значительных скоростях нагружения. Для этой цели необходимы специальные динамические испытания с определением новых характеристик материала.

Одним из наиболее распространённых испытаний, позволяющих оценить сопротивление материала динамическим нагрузкам, является испытание на удар до разрушения. Так как измерение сил и напряжений при ударе связано с большими техническими трудностями по причине чрезвычайной кратковременности процесса и переменности усилия в этот короткий интервал времени, для оценки сопротивления материала излому ударом вводят механическую характеристику – ударная вязкость. Величина ударной вязкости  $a_K$  измеряется отношением количества энергии  $T$ , затраченной на излом образца, к площади поперечного сечения образца  $A$  в месте излома

$$a_K = \frac{T}{A}, \text{ Дж} / \text{мм}^2$$

#### Измерительные приборы и испытательная машина

Определение ударной вязкости металлов производят на маятниковых копрах (рисунок 29) с запасом энергии 300 Дж, так как большой избыток энергии, остающейся после удара, отрицательно влияет на точность измерения. Копёр состоит из чугунной станины 1, выполненной в виде массивной фундаментной плиты с двумя вертикальными колоннами,

маятника 2 и измерительного устройства 3. Вверху на колоннах станины помещена горизонтальная ось 4, свободно вращающаяся в шариковых подшипниках. На этой оси в промежутке между колоннами насажен маятник 2, состоящий из стержня подвеса и тяжёлого молота в виде плоского диска. Молот имеет глубокий вырез, на дне которого закреплён нож 5 из закалённой стали, являющийся бойком маятника. Ударная грань ножа точно совпадает с прямой, проходящей через центр оси 4 и центр тяжести маятника. В нерабочем состоянии маятник свободно висит, и прямая, соединяющая его центр тяжести с центром оси 4, строго вертикальна.

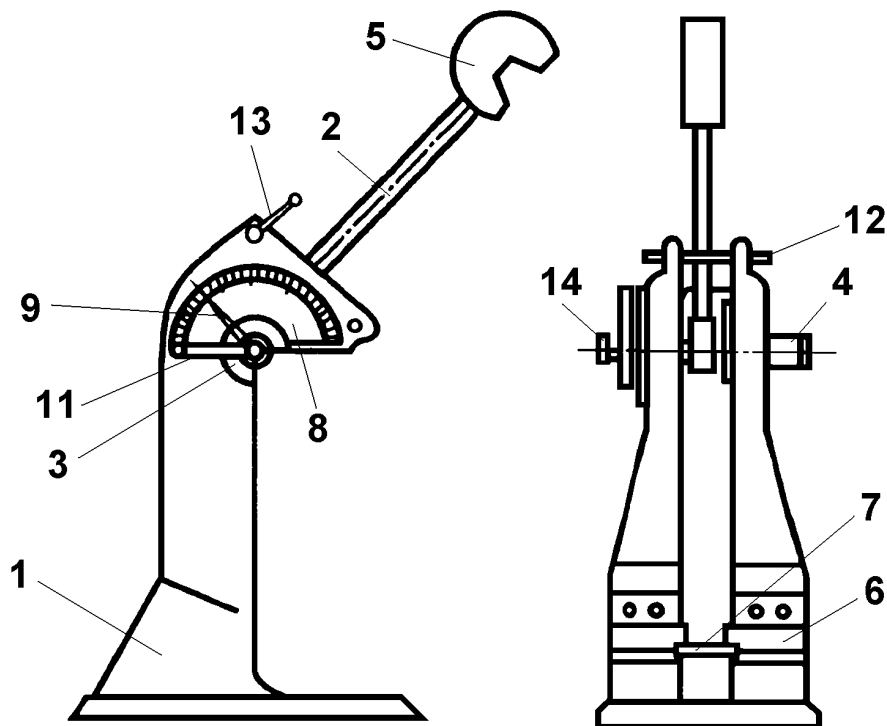


Рисунок 29

Внизу на уровне ножа вертикально висящего маятника, к колоннам станины прикреплены две опоры 6. Опоры – передвижные, что позволяет устанавливать нужное расстояние между ними применительно к размерам намеченного к испытанию образца 7.

Измерительное приспособление копра представляет собой неподвижный полукруглый диск 8, укрепленный на одной из колонн станины концентрично с осью 4 маятника. На диске имеется шкала с делениями в единицах работы. Стрелка 9 измерительного устройства плотно надета на ось 4, вследствие чего она вращается вместе с осью и маятником. На эту же ось насажен и упор 11, перемещающий стрелку 9 по шкале измерения работы при разрушении образца при испытании.

Для испытания маятник поднимают на исходную высоту и удерживают во взведённом состоянии при помощи специальных защёлок 12. Затем на опорах 6 свободно размещают надрезанный образец 7, не закрепляя его. Надрез располагают в сторону по направлению удара и строго по центру опор с тем, чтобы удар ножа маятника пришелся по грани образца, противоположной надрезу. Для быстрого и точного размещения образца на опорах следует пользоваться специальным шаблоном, обеспечивающим симметричное расположение надреза относительно опор с погрешностью не более  $\pm 0,5$  мм.

#### Описание установки

Образец, предназначенный для испытания на излом ударом, имеет форму бруска прямоугольного поперечного сечения. Схема установки образца на маятниковом копре представлена на рисунке 30.

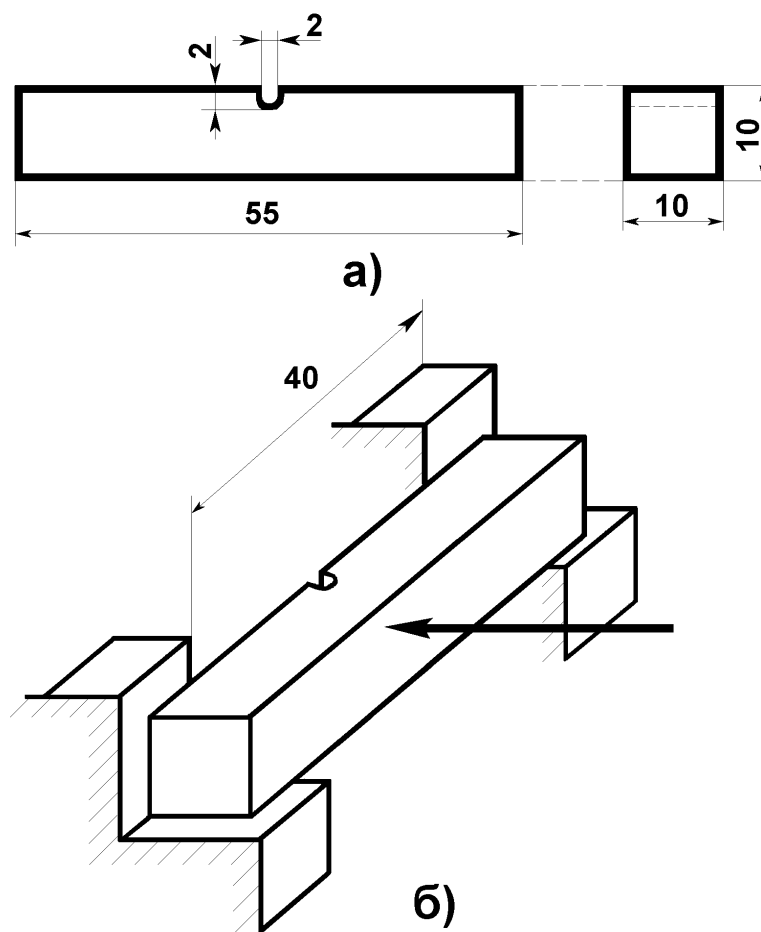


Рисунок 30

В средней части образца, в сечении, по которому производится удар. Сделана прорезь. Назначение её – создать в месте удара трёхосное напряжённое состояние, вызвать резкую концентрацию напряжений и локализовать пластические деформации в малом объёме. Именно эти факторы способствуют хрупкому разрушению при ударе.

Принцип его действия следующий. Маятник весом  $G$  поднимается в исходное положение на высоту  $H_0$  и при свободном падении в самой нижней точке траектории разбивает образец. Продолжая движение, маятник поднимается на высоту  $H_1$ . Работа, затраченная на излом образца, измеряется разностью величин энергий, которыми обладает маятник до и после удара:

$$W = G \cdot (H_0 - H_1) - T_c,$$

где  $T_c$  – энергия, затрачиваемая на преодоление вредного сопротивления (сил трения).

#### Порядок проведения опыта

Размеры образца до испытания следующие:

Полная длина, мм \_\_\_\_\_

Рабочая длина, мм \_\_\_\_\_

Ширина рабочего поперечного сечения, мм \_\_\_\_\_

Высота рабочего поперечного сечения, мм \_\_\_\_\_

Рабочая площадь образца, мм<sup>2</sup> \_\_\_\_\_

### Эскиз образца и схема установки

Порядок работы на копре следующий. Упор 11 совмещают со стрелкой 9, устанавливая её на деление 30 измерительной шкалы. При этом упор должен находиться под стрелкой. Поднимают маятник 2 и опирают его на деревянную рейку, прижимаемую маятником к колоннам станины, после этого укладывают испытуемый образец на опоры 6. Маятник поднимают в верхнее положение до зацепления с защёлкой 12. Затем с помощью рукоятки 13 защёлки освобождают маятник, который, падая, наносит удар по образцу, разрушая его.

После разрушения образца диск маятника поднимается на некоторую высоту. При этом упор 11, поворачиваясь вместе с маятником, отводит стрелку снизу вверх до положения, соответствующего подъёму маятника; в этом положении стрелка остаётся и при обратном движении маятника. Отсчёт по шкале от нулевого деления до деления, против которого остановилась стрелка, даёт величину энергии, затраченной на разрушение образца, а отсчёт от стрелки до конца шкалы – избыточный запас энергии маятника.

Для остановки качающегося маятника необходимо нажать рукой на выступ 14, который другим концом входит в отверстие тормозного диска. Торможение рекомендуется производить тогда, когда маятник находится в вертикальном положении.

### Обработка результатов испытания

После остановки качания маятника записать значение работы разрушения образца по показаниям стрелки на измерительной шкале.

Работа холостого хода испытательной машины, Дж

---

Работа, затраченная на излом образца, Дж

---

Удельная ударная вязкость, Дж / мм<sup>2</sup> \_\_\_\_\_

### Вопросы для самоподготовки

1. Как оценивают сопротивление материалов разрушению при больших скоростях нагружения?
2. По какому критерию оценивают способность материала сохранять пластические свойства при динамическом нагружении?
3. Как устроен маятниковый копр и его измерительное устройство?
4. Как оценивают потери на трение и сопротивление внешней среды при испытании на маятниковом копре?
5. Как вычисляют ударную вязкость материала?
6. Что называют удельной ударной вязкостью материала?
7. Какова роль надреза в образце?
8. Приведите формулу для определения удельной ударной вязкости.
9. Дайте определение динамической нагрузки. Перечислите особенности её действия на детали сооружения.
10. Опишите влияние ударной нагрузки на механические характеристики материала.
11. Назовите оборудование, используемое в работе.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ СЖАТОЙ СТОЙКИ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Ознакомиться на опыте с явлением потери устойчивости стержня прямолинейной формы при сжатии (продольном изгибе стержня). Опытным путём найти величину критической силы прямолинейного сжатого стержня и сравнить её со значением, полученным по формуле Эйлера.

#### Общие сведения

Равновесие абсолютно твёрдого тела может быть устойчивым, безразлично-устойчивым и неустойчивым.

Длинный стержень при действии сравнительно небольшой осевой сжимающей силы (меньше некоторого критического значения) находится в состоянии устойчивого равновесия (рисунок 31а).

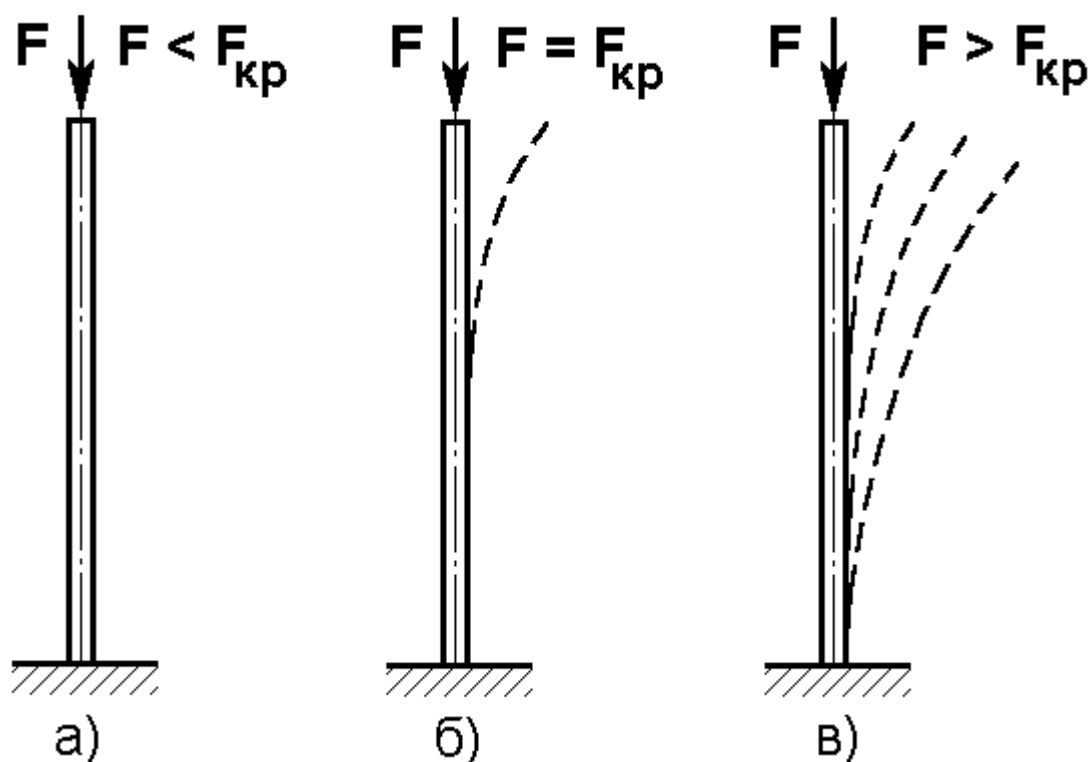


Рисунок 31

Если незначительно изогнуть его какой-нибудь поперечной нагрузкой и затем эту нагрузку убрать, то стержень вновь распрямится, примет первоначальную форму равновесия (рисунок 31б).

Искривлённая форма равновесия стержня при этом оказывается неустойчивой и поэтому невозможной.

При значении сжимающей силы, превосходящей определённую критическую величину, наоборот, прямолинейная форма равновесия становится неустойчивой и поэтому сменяется криволинейной формой равновесия, которая оказывается при этом устойчивой (рисунок 29в).

Если прямолинейный стержень, шарнирно закреплённый по концам, сжать центрально приложенными силами  $F$ , то при возрастании этих сил он будет вначале только сжиматься, сохраняя прямолинейную форму. Затем, после достижения силой  $F$  определённого значения, произойдёт искривление оси стержня, (отмечено пунктиром на рисунке 32).

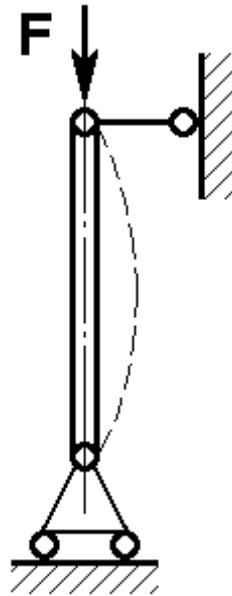


Рисунок 32

Наименьшее значение центрально приложенной сжимающей силы  $F$ , при котором прямолинейная форма равновесия стержня становится неустойчивой, называется **критической силой**.

Увеличение нагрузки сверх критической приводит к быстрому росту деформаций и практически означает выход системы из строя.

Решение этой задачи впервые было дано в 1744 году Эйлером и поэтому формула носит его имя:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \lambda)^2}$$

где  $E$  – модуль продольной упругости; для стали  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;

$J_{min}$  - минимальный осевой момент инерции поперечного сечения, так как потеря устойчивости происходит в плоскости наименьшей жёсткости;

$l$  - длина стержня;

$\mu$  - Коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления концов стержня (рисунок 33).

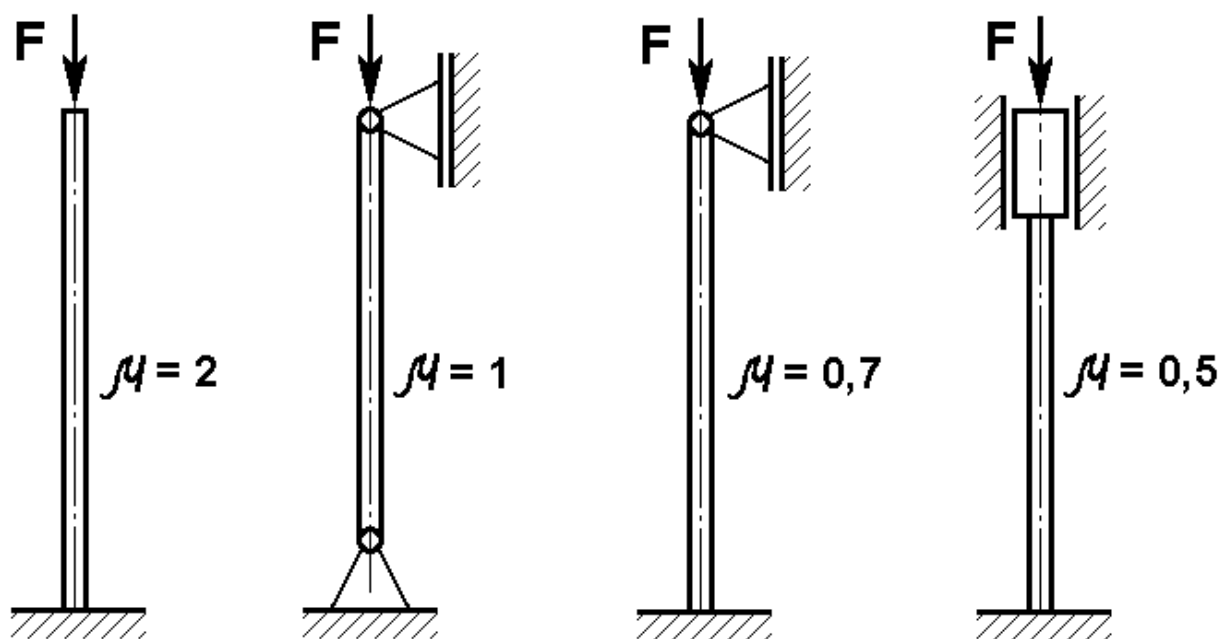


Рисунок 33

Формула Эйлера применима, если гибкость стержня определенная по формуле:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i_{min}}$$

где  $i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$  - минимальный радиус инерции сечения стержня;

$A$  – площадь поперечного сечения стержня;  
 больше предельной:

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{тц}}}$$

соответствующего пределу пропорциональности материала.

Предельные значения гибкости:

- для стали (ст.3) 100;
- для древесины около 110.

При гибкости стержня меньше предельной  $\lambda$  формула Эйлера неприменима, так как потеря устойчивости происходит при напряжениях, превосходящих предел пропорциональности.

Практически определить момент перехода из прямолинейного состояния в искривлённое можно только приближённо. Искривление стержня происходит в плоскости, перпендикулярной к главной оси - минимум ( $J=J_{min}$ ) поперечного сечения. То есть при изгибе сечения поворачиваются вокруг оси – минимум. Исключением являются случаи, когда условия закрепления концов стержня в различных плоскостях, проходящих через его ось, различны. На практике изготовить идеально прямой стержень, многократно используемый при испытаниях, практически невозможно. Другая трудность заключается в осуществлении строго центрального нагружения образца. Поэтому в реальных условиях ось стержня даже при нагрузках, меньших критического значения, начинает искривляться. Из-за



этого часто приходится отказываться от непосредственного определения критической силы и переходить к косвенному методу.

### Сущность косвенного метода

Если имеем стержень с предварительно искривлённой осью (рисунок 34), то приложение сил  $F$  создаст ещё большее искривление оси.

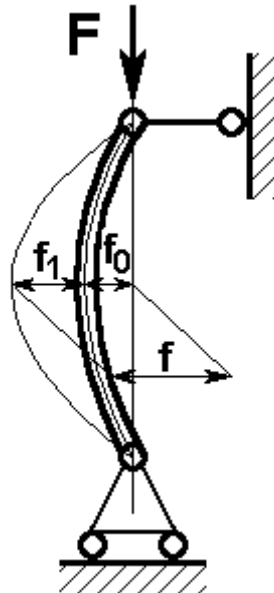


Рисунок 34

Обозначим через  $f_0$  – наибольший прогиб до приложения нагрузки, а через  $f$  – наибольший прогиб при действии сжимающих сил  $F$ . Из теории продольного изгиба известна приближённая зависимость

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{F}{F_э}}$$

где  $F_э = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \lambda)^2}$  - Эйлера сила.

Эту силу вычисляют как критическую для прямолинейного стержня с теми же размерами, что и заданный искривлённый стержень. Искривлённый стержень с самого начала нагружения испытывает изгиб, поэтому для него не существует понятия критической силы, как силы знаменующей переход из одного состояния в другое, качественно иное. Но численное совпадение критической и Эйлеровой сил позволяет определить критическую силу прямолинейного стержня через равную ей Эйлерову силу для искривлённого стержня.

График на рисунке 35 показывает, что при возрастании прогиба  $f$  сжимающая сила  $F$  асимптотически приближается к величине Эйлеровой силы.

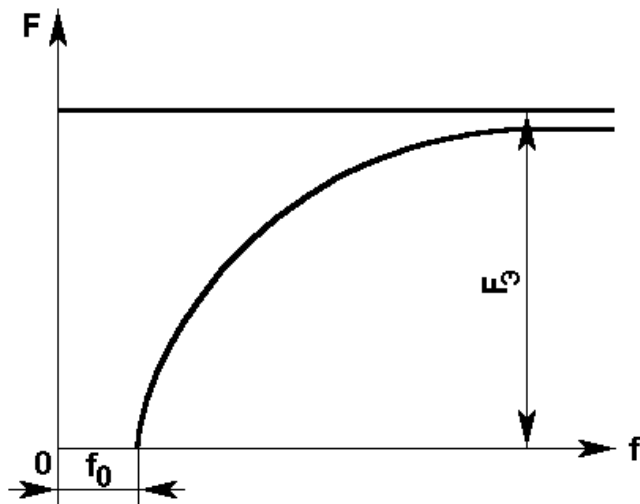


Рисунок 35

Однако из-за слишком большого искривления оси стержня нельзя достигнуть значений  $F$ , достаточно близких к величине  $F_{\text{Э}}$ . Кроме того, при больших деформациях приведённая выше формула для  $f$  перестаёт быть справедливой. Удачный способ получения Эйлеровой силы предложен Саусвеллом.

Представим прогиб  $f$  в виде  $f = f_0 + f_1$   
 где  $f_0$  – начальный прогиб (неизвестный);  
 $f_1$  – дополнительный прогиб от силы  $F$  (рисунок 34).  
 Таким образом

$$f = f_0 + f_1 = \frac{f_0}{1 - \frac{F}{F_{\text{Э}}}}$$

Преобразуем это выражение

$$f_0 + f_1 = f_0 + f_1 \cdot \frac{F}{F_{\text{Э}}} + f_0 \cdot \frac{F}{F_{\text{Э}}}$$

Упрощая и одновременно деля все члены на  $F$ , получим

$$\frac{f_1}{F} = \frac{f_1}{F_{\text{Э}}} + \frac{f_0}{F_{\text{Э}}}$$

В этом уравнении  $f_0$  и  $F_{\text{Э}}$  являются постоянными величинами, а  $f_1$  и  $F$  – переменными. В качестве одной переменной выберем  $y = \frac{f_1}{F}$ , а в качестве другой переменной -  $x = \frac{f_1}{F_{\text{Э}}}$ ;

тогда получим линейную зависимость

$y = kx + b$ , где угловой коэффициент прямой  $k$  представляет величину обратную Эйлеровой силе:

$$k = \frac{1}{F_{\text{Э}}}$$

Поэтому, имея несколько значений дополнительного прогиба  $f_1$  при различных величинах силы  $F$ , можно построить график зависимости  $y = \frac{f_1}{F}$  от  $f_1$ . Он представляет прямую, котангенс угла наклона которой равен Эйлеровой силе  $F_Э$  (рисунок 36).

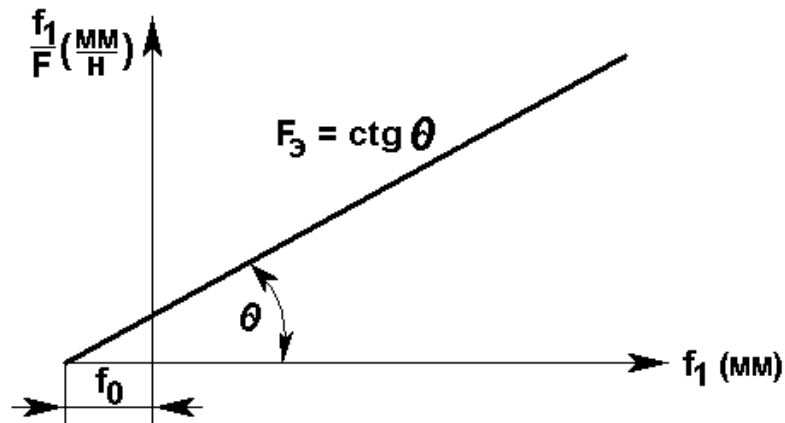


Рисунок 36

#### Порядок проведения работы

1. Измерить размеры поперечного сечения стержня и его длину.
2. Установить стержень в зажимах испытательной машины и записать характер крепления верхнего и нижнего концов стержня.
3. Для придания стержню предварительного искривления (рисунок 37) и ликвидации зазоров подать небольшую нагрузку (2-5 Н).

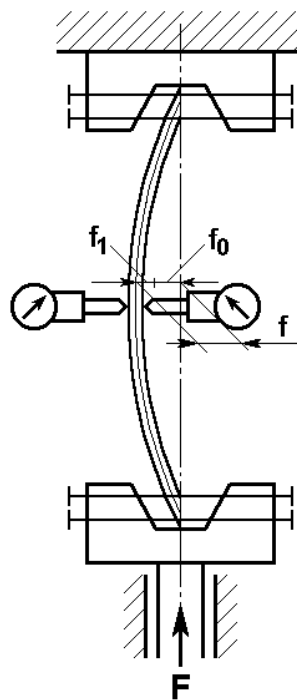


Рисунок 37

4. Вращая шкалу индикаторов, установить стрелки в нулевое положение (рисунок 37).

5. Подать ряд различных последовательно возрастающих нагрузок и записать показания индикаторов. Эти показания дают нам дополнительный прогиб  $f_1$ . Опыт прекратить, когда прогиб  $f_1$  достигнет величины  $6 \div 10$  мм.

### Обработка результатов работы

1. Среднее значение дополнительного прогиба  $f_1$ , при каждой нагрузке  $F$ .

$$f_1^{cp} = \frac{f_1^{лев} + f_1^{np}}{2}$$

2. Вычислить при каждой нагрузке  $F$  отношение  $\frac{f_1}{F}$ .

3. Построить график зависимости  $y = \frac{f_1}{F}$  от  $x_1 = f_1$  (рисунок 38).

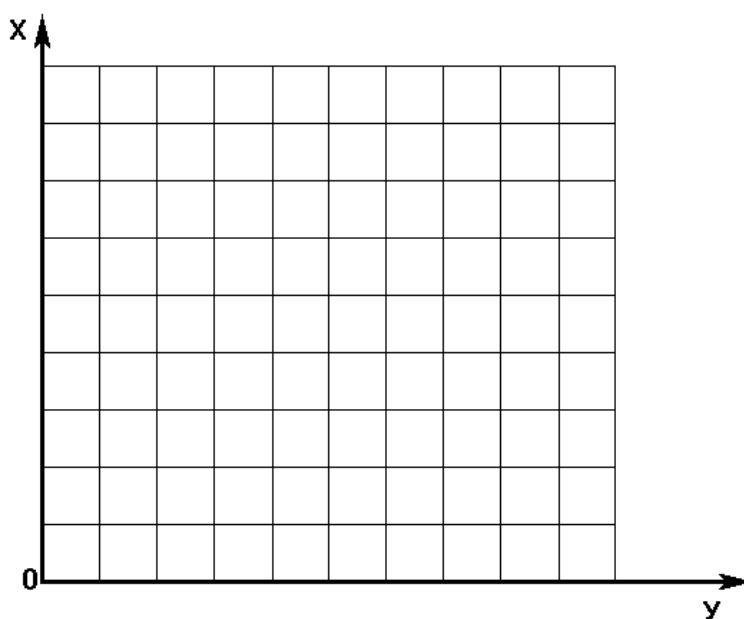


Рисунок 38

Для этого предварительно выбрать масштабы, которые используют при откладывании по оси абсцисс дополнительного прогиба  $f_1$  ( $m_a$  мм/мм) и по оси ординат – отношение

$\frac{f_1}{F} \left( m_0 : \frac{мм}{Н} / мм \right)$ . Нанести на диаграмму точки, соответствующие каждому моменту

измерения. Через полученные таким образом точки провести прямую линию. Если точки ложатся несколько разбросанно, то приходится проводить усреднено.

4. Вычислить  $ctg \theta$  и умножить его на отношение масштабов  $m_a$  и  $m_0$ .

$$F_{\text{Э}} = ctg \theta \cdot \frac{m_a}{m_0}$$

Экспериментальное значение Эйлеровой силы  $F_{\text{Э}}$  численно равно критической силе  $F_{\text{кр}}$  для прямолинейного стержня тех же размеров.

5. Найти критическую силу  $F_{\text{кр}}$  по формуле Эйлера, предварительно вычислив гибкость стержня, и сопоставить с величиной Эйлеровой силы определённой по графику

$$\delta = \frac{F_{\text{Э}} - F_{\text{КР}}}{F_{\text{Э}}} \cdot 100\%$$

6. Найти начальный прогиб  $f_0$ , который равен отрезку, отсекаемому прямой на оси абсцисс (с учётом масштаба  $n_a$ ).

Данные испытаний занести в таблицу 7.

Таблица 7

Нагрузка F, Н	Отсчёты по индикаторам		Средний отсчёт прогиба f, мм	Отношение $\frac{f_1}{F}$ , мм/Н
	левый f, мм	правый f, мм		

### Вопросы для самоподготовки

1. Что такое устойчивость?
2. В чём заключается явление потери устойчивости равновесного состояния стержня?
3. Как определяют критическую силу для стержней средней и малой гибкости?
4. Влияет ли форма поперечного сечения на критическую силу стержня? (два стержня шарнирно опираются по концам и сжаты силами F. Поперечное сечение одного из них круглое, а другого – квадратное. Для какого из стержней критическая сила окажется больше, если модуль упругости, длина и площадь поперечного сечения у них одинаковы?).
5. Какое влияние оказывают на критическую силу упругие и прочностные характеристики материала при потере устойчивости стержня в упругой стадии?
6. Какой физический смысл имеет понятие свободной (приведённой) длины стержня?
7. Что называют критической силой?
8. Что такое гибкость стержня и от чего она зависит?
9. Каковы наиболее рациональные формы поперечных сечений сжатых стержней?