

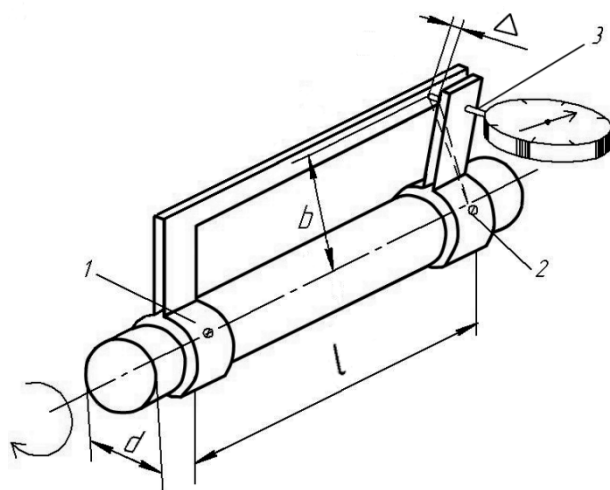
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра механики машин и основ конструирования

МЕХАНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов очной формы обучения
направления 20.03.01



Курган 2019

Кафедра: «Механика машин и основы конструирования».

Дисциплина: «Механика» (направление 20.03.01).

Составили: канд. техн. наук, доц. В. К. Коротовских,
канд. техн. наук, доц. С. Г. Тютрин.

Утверждены на заседании кафедры «17» октября 2018 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2017 г.

Лабораторная работа № 1

Испытание металлов на растяжение

Цель работы: определение механических характеристик прочности и пластичности стали при растяжении.

Основные положения

Для количественной оценки поведения различных материалов под нагрузкой используются механические характеристики, необходимые для расчета и проектирования элементов конструкций. Наибольшую информацию о механических свойствах металлов можно получить из статических испытаний образцов на растяжение. Испытания для условий нормальной температуры (10–35⁰С) проводятся в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение». Из исследуемого материала изготавливают специальные образцы. Согласно стандарту предусмотрено семь типов *цилиндрических* образцов с диаметром d_0 от 3 до 25 мм и два типа *плоских* образцов. Образцы имеют рабочую часть и головки с плавным переходным участком. На рабочей части наносятся две метки на расстоянии начальной расчетной длины l_0 , для которой определяется удлинение. В зависимости от соотношения между расчетной длиной и диаметром применяются цилиндрические образцы с $l_0 = 10d_0$ и с $l_0 = 5d_0$. В данной лабораторной работе используется один из типов образцов (рисунок 1.1) диаметром d_0 и расчетной длиной $l_0 = 10d_0$.

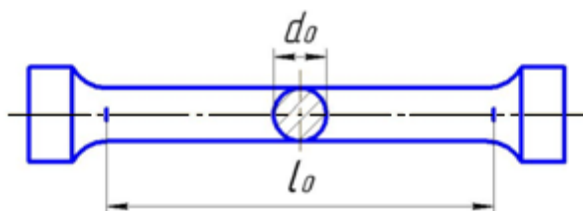


Рисунок 1.1 – Образец для испытания на растяжение

Испытания проводят на специальных разрывных или универсальных машинах. В зависимости от метода приложения нагрузки, машины бывают с механическим или гидравлическим приводом. Они обычно выпускаются с вертикальным расположением образца. Передача усилия на образец осуществляется через захваты. Большинство испытательных машин снабжено устройством для автоматической записи в определенном масштабе *диаграммы растяжения*, т. е. графика зависимости между растягивающей силой P и удлинением образца Δl .

В предлагаемой лабораторной работе для испытания используется разрывная машина модели *P-10* (рисунок 1.2) грузоподъемностью 100 кН (10 тс). Разрывная машина предназначена для статических испытаний на растяжение образцов из металлов и сплавов, а также изделий из них. При применении дополнительных приспособлений могут производиться испытания на сжатие и изгиб.

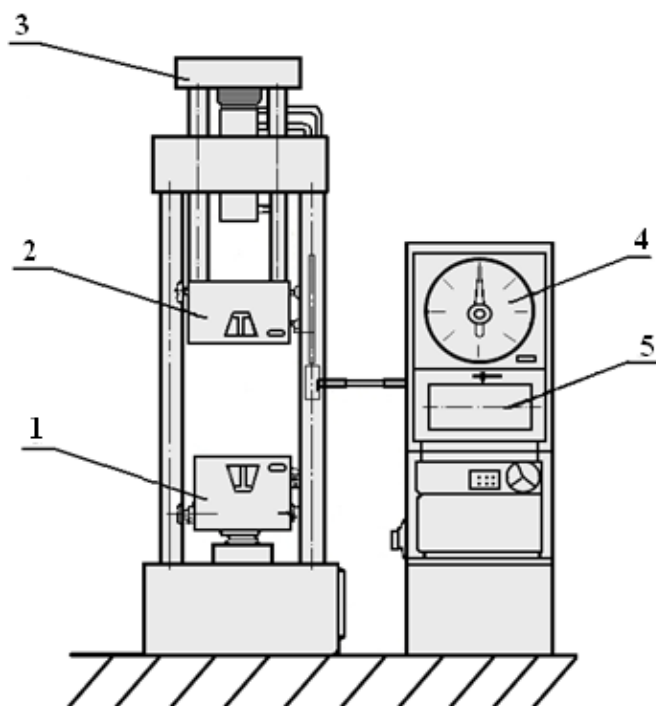


Рисунок 1.2 – Схема разрывной машины модели P-10

Основными узлами машины модели P-10 являются нагружающее устройство (слева) и пульт управления (справа). С помощью нагружающего устройства производится деформирование и разрушение образцов. Для закрепления и растяжения образца в устройстве имеются два захвата 1 и 2. При приложении нагрузки нижний захват 1 неподвижен, а захват 2 вместе с подвижной рамой 3 перемещается вверх, растягивая образец до разрыва. Пульт управления служит для осуществления нагружения и контроля величин усилий и деформаций. Для этого используется силоизмеритель 4 с рабочей и контрольной стрелками и диаграммный аппарат 5, которые позволяют получить диаграмму «нагрузка – удлинение». С целью повышения точности опытных данных в машине предусмотрено три диапазона нагрузок: до 2 тс; до 5 тс; до 10 тс.

На рисунке 1.3 представлена типичная диаграмма растяжения $\Delta l = f(P)$ образца из пластичной низкоуглеродистой стали. На диаграмме можно выявить все наиболее важные особенности нагружения металлов. Эта диаграмма условно может быть разделена на четыре основных участка. Ее первый участок OA – прямая наклонная линия. Это значит, что при $P \leq P_{\text{пц}}$ соблюдается прямая пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией, называемая *законом Гука*. Сила $P_{\text{пц}}$ в точке A является силой, соответствующей пределу пропорциональности. Участок OA называется *зоной упругости*, потому что здесь возникают только упругие деформации. *Упругими* называются деформации, которые исчезают после снятия нагрузки с образца. При этом образец *возвращается* к своим начальным размерам.

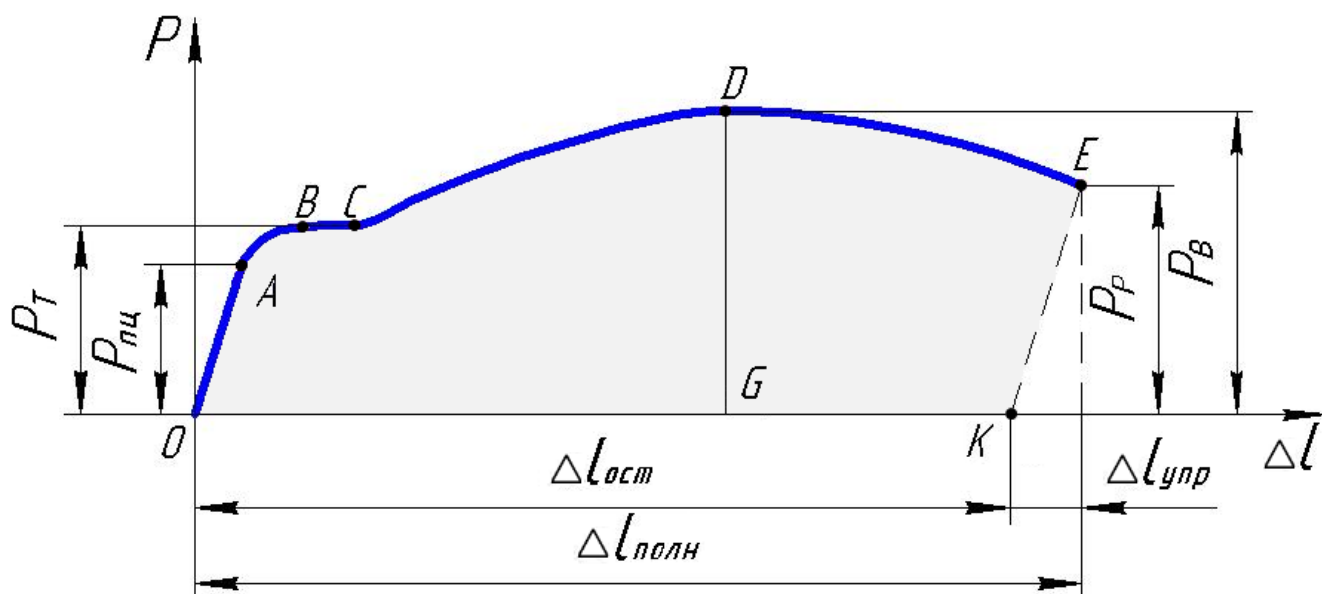


Рисунок 1.3 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Выше точки *A* диаграмма становится криволинейной (участок *AB*). Затем в точке *B* кривая переходит в горизонтальный участок *BC*. Здесь образец удлиняется при практически неизменной нагрузке – материал «течет». Горизонтальный (или почти горизонтальный) участок *BC* называется зоной общей текучести, или «площадкой текучести». В этой зоне начинают интенсивно развиваться *остаточные* или *пластические* деформации. Остаточные деформации являются необратимыми. Они не исчезают (остаются) после снятия нагрузки, что приводит к *изменению* первоначальных размеров образца. Сила P_T в точках *B* или *C* является силой при физическом пределе текучести материала.

После площадки текучести материал снова приобретает способность сопротивляться деформации при возрастающей нагрузке («самоупрочняться») вплоть до максимального значения силы (точка *D*). Участок *CD* называется зоной упрочнения. Здесь удлинение образца происходит также равномерно по всему его объему, как и на предыдущих участках. Однако возрастание силы на стадии упрочнения более медленное, чем в зоне упругой деформации *OA*.

При достижении *максимальной* силы $P_{max} = P_B$ (точка *D*) способность материала к дальнейшему упрочнению исчерпывается. На образце начинает формироваться так называемая «шейка». Она быстро прогрессирует. Площадь поперечного сечения образца резко уменьшается, что приводит к падению нагрузки. Дальнейшее растяжение происходит только за счет *местной* пластической деформации металла в «шейке», после чего наступает разрыв (в точке *E*) под действием разрушающей силы P_P . Последний участок *DE* диаграммы – это *зона местной текучести*.

Наибольшее усилие, предшествующее разрушению образца, принимается за силу P_B , соответствующую временному сопротивлению (пределу прочности).

По диаграмме растяжения могут быть определены основные механические характеристики прочности и пластичности материала.

Механические характеристики прочности

Под *прочностью* понимается способность материала сопротивляться действию нагрузок без разрушения и возникновения недопустимых для нормальной работы конструкции пластических деформаций. Количественно это свойство определяется следующими напряжениями.

1 *Предел пропорциональности* $\sigma_{\text{пц}}$ – наибольшее напряжение, до которого выполняется закон Гука (напряжение прямо пропорционально деформации):

$$\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}} / F_0, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{пц}}$ – сила, соответствующая пределу пропорциональности, т. е. сила, где заканчивается прямая линия (точка *A*, рисунок 1.3);

F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Кроме того, независимо от предела пропорциональности, существует *предел упругости* σ_y – напряжение, до которого в материале имеются только упругие деформации. Этот предел σ_y характеризует начало перехода от упругой стадии деформации *OA* к упругопластической *BE*. Однако у большинства конструкционных материалов численные значения пределов $\sigma_{\text{пц}}$ и σ_y незначительно отличаются друг от друга ($\sigma_{\text{пц}} \approx \sigma_y$). Поэтому обычно определяется только одно напряжение $\sigma_{\text{пц}}$.

В упругопластической стадии *BE* общая деформация состоит из упругой и остаточной. Так, например, полное удлинение в момент разрыва $\Delta l_{\text{полн}}$ равняется сумме упругого $\Delta l_{\text{упр}}$ и остаточного $\Delta l_{\text{ост}}$.

2 *Предел текучести (физический σ_T или условный $\sigma_{0,2}$)* – важнейшая механическая характеристика пластичных металлов и сплавов. При наличии на диаграмме «площадки текучести» определяется *физический* предел текучести σ_T – напряжение, при котором происходит интенсивный рост остаточных деформаций при постоянном напряжении:

$$\sigma_T = P_T / F_0, \quad (1.2)$$

где P_T – сила, вызывающая текучесть материала (точка *B*, рисунок 1.3).

Для многих материалов (среднеуглеродистых и легированных сталей, меди, дюралюминия и т. п.), называемых *хрупкопластичными*, на диаграмме отсутствует явно выраженная «площадка текучести» (рисунок 1.4).

В этом случае находится *условный* предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором остаточная деформация образца $\Delta l_{\text{ост}}$ достигает 0,2%, т. е. $\Delta l_{0,2}$:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0, \quad (1.3)$$

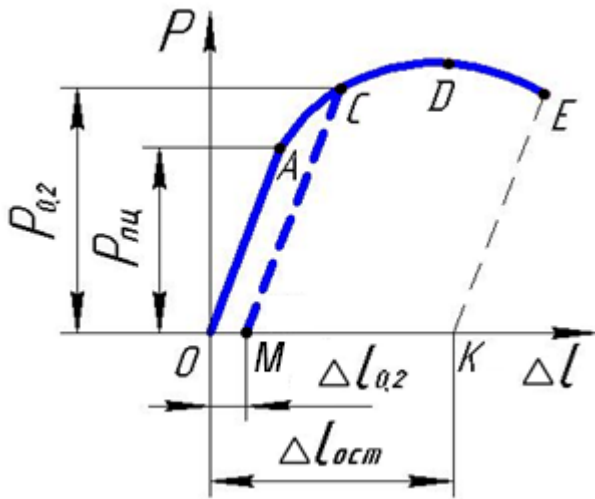


Рисунок 1.4 – Определение силы $P_{0,2}$, соответствующей условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$

держат материал без разрушения:

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{в}} / F_0, \quad (1.4)$$

где $P_{\text{в}}$ – максимальная сила, предшествующая разрыву образца (точка D).

Напряжение $\sigma_{\text{в}}$ является условным, т. к. его фактическая величина больше, чем величина, вычисляемая по формуле (1.4). Это объясняется тем, что в формуле используется начальная площадь сечения F_0 . На самом деле, эта площадь имеет другое – меньшее значение.

4 Истинное сопротивление разрыву (или истинный предел прочности) $\sigma_{\text{р}}$ – напряжение в момент разрыва образца:

$$\sigma_{\text{р}} = P_{\text{р}} / F_{\text{к}}, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{р}}$ – величина силы, соответствующей разрушению (точка E); $F_{\text{к}}$ – конечная наименьшая площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (измеренная после извлечения образца из захватов машины).

Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ и временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ являются предельными (опасными) напряжениями и могут быть найдены только опытным путем при испытаниях материалов. Эти механические характеристики используются в расчетах на прочность для нахождения допускаемых напряжений. Величина рабочих напряжений, возникающих в деталях машин из любых материалов, не должна превышать напряжения $\sigma_{\text{в}}$, так как это приведет к их разрушению. Более того, для пластичных материалов величина рабочих напряжений должна быть меньше предела текучести $\sigma_{\text{т}}$. Это объясняется необходимостью сохранения начальных размеров и формы элементов конструкций, что возможно только при отсутствии остаточных деформаций. Чем больше величина предельных напряжений, тем выше прочность материала.

где $P_{0,2}$ – сила, соответствующая остаточному удлинению в 0,2% от расчетной длины образца l_0 , то есть $0,002l_0$.

Для нахождения численной величины силы $P_{0,2}$ на диаграмме растяжения по оси абсцисс с учетом увеличенного масштаба откладывают отрезок $\Delta l_{0,2} = 0,002l_0$ (отрезок OM) и из точки M проводят прямую MC, параллельную прямолинейному участку OA. Точка пересечения этой прямой с диаграммой (точка C) и определяет величину силы $P_{0,2}$.

3 Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_{\text{в}}$ – наибольшее условное напряжение, которое способен вы-

Механические характеристики пластичности

Под *пластичностью* понимается способность твердых тел изменять свои размеры и форму при нагружении и сохранять их после снятия нагрузки. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций, как штамповка, гибка, вытяжка, волочение, ковка и др.

Пластичными принято считать материалы, разрушению которых предшествуют большие остаточные деформации (например, низкоуглеродистые стали, медь, алюминий и их сплавы).

Хрупкость – свойство противоположное пластичности. *Хрупкими* называются материалы, разрушающиеся при незначительных остаточных деформациях (чугун, высокоуглеродистые инструментальные стали, керамика, стекло и т. п.).

К характеристикам пластичности материала относятся *относительные остаточные*: удлинение δ и сужение сечения ψ после разрыва образца. Чем больше величины δ и ψ , тем пластичнее материал.

Относительное остаточное удлинение δ , %:

$$\delta = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} \cdot 100\% = \frac{l_{к} - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

где $\Delta l_{ост} = l_{к} - l_0$ – абсолютная остаточная деформация (изменение начальной длины l_0 расчетной части); $l_{к}$ – конечная длина расчетной части образца после разрыва.

Значение δ для одного и того же материала зависит от длины расчетной части образца или от его кратности (отношения l_0/d_0). Так, для низкоуглеродистой стали Ст3, у коротких образцов ($l_0/d_0 = 5$) удлинение – $\delta_5 = 25\%$, у образцов с $l_0/d_0 = 10$ деформация достигает $\delta_{10} = 21\%$.

Относительное остаточное сужение поперечного сечения ψ , %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_{к}}{F_0} \cdot 100\%. \quad (1.7)$$

Пластичными принято считать материалы, у которых указанные характеристики находятся в пределах: $\delta = 20\text{--}30\%$, $\psi = 50\text{--}70\%$. Для *хрупких* материалов δ не превышает обычно $2\text{--}5\%$, $\psi = 30\%$. Материалы (бронза, дюралюминий, легированные стали и т. п.) с характеристиками $\delta = 5\text{--}20\%$ и $\psi = 30\text{--}50\%$ называются *хрупкопластичными*.

Порядок выполнения работы

1 С помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм измерить начальный диаметр d_0 образца. Нанести на его рабочей части две граничные метки расчетной длины $l_0 = 10d_0$.

2 Вычислить площадь поперечного сечения $F_0 = \pi d_0^2/4$.

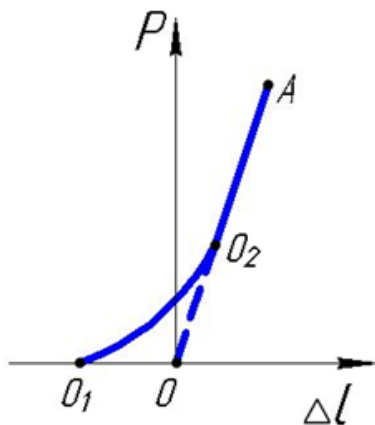
3 Закрепить образец в захватах машины и настроить диаграммный аппарат.

4 Произвести плавное (статическое) растяжение образца до разрыва с записью диаграммы зависимости между нагрузкой P и удлинением Δl .

5 Зафиксировать по шкале силоизмерителя (можно использовать контрольную стрелку) значение максимальной силы P_B , Н.

6 Обработать полученную диаграмму. В начальной стадии деформации образца происходит обжатие его головок в захватах и выборка зазоров. Поэтому соответствующая часть диаграммы может быть криволинейной (рисунок 1.5). Для нахождения начала координат диаграммы (точки O), нужно продолжить прямую линию пропорциональной зависимости O_2A до пересечения с осью абсцисс Δl , проведенной через точку O_1 . Из начала координат восстанавливается ось ординат P . Таким образом, согласно рекомендации ГОСТ 1497-84 участок O_1O_2 диаграммы отбрасывается.

7 Отметить на диаграмме её характерные точки A , B (C), D , E (рисунок 1.3) и измерить (в мм) их ординаты, т. е. расстояния от оси Δl до точек.



8 Измерить конечные размеры образца после разрушения: наименьший диаметр шейки d_k в месте разрыва и длину расчетной части l_k . Для определения конечной длины l_k нужно сложить вместе, как можно плотнее, две части разрушенного образца и найти расстояние между метками.

9 Провести на диаграмме прямую EK параллельно начальной прямой линии OA . Полученный на оси абсцисс отрезок OK отображает на графике

Рисунок 1.5 – Выбор начала координат

диаграммы растяжения величину остаточного удлинения образца после разрыва $\Delta l_{ост}$. Фактическая величина этой остаточной деформации равна разности конечной и начальной длин образца $\Delta l_{ост} = l_k - l_0$ (упругая часть $\Delta l_{упр}$ после разрыва исчезает).

10 Измерить (в мм) на диаграмме отрезки OK и $\Delta l_{упр}$.

11 Найти для полученной диаграммы масштабы силы m_P и деформации $m_{\Delta l}$ по осям ординат и абсцисс.

Масштаб силы m_P – это величина силы, приходящаяся на один миллиметр диаграммы (Н/мм). Масштаб устанавливается путем деления найденной из

опыта максимальной силы P_B на измеренную по диаграмме ординату DG (рисунки 1.3):

$$m_P = \frac{P_B}{DG}. \quad (1.8)$$

Масштаб деформации m_{Δ} , то есть остаточная деформация $\Delta l_{ост}$ образца, соответствующая одному делению диаграммы, мм/мм:

$$m_{\Delta} = \frac{l_K - l_0}{OK}. \quad (1.9)$$

12 С помощью масштаба сил и величин ординат (пункт 7) найти численные значения нагрузок $P_{шт}$, P_T , P_P (Н).

13 Используя масштаб деформации m_{Δ} и длину отрезка $l_{упр}$ на диаграмме (пункт 10), определить величину исчезнувшей упругой деформации.

14 Вычислить механические характеристики прочности и пластичности испытуемого образца. Все данные испытания занести в отчет по работе.

15 По полученным из опыта механическим характеристикам, определить примерную марку стали испытуемого образца (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Механические характеристики некоторых низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Низкоуглеродистые				Низколегированные			
Марка стали	Предел текучести (физический) σ_T в МПа, не менее	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_{10} , %	Марка стали	Предел текучести (условный) $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_{10} , %
					не менее		
Ст0	190	320–470	18	16ГС	265	430	21
Ст2	220	340–420	26	09Г2	295	430	
Ст3	240	380–470	21–23	12ГС	315	450	
Ст4	260	420–520	19–21	09Г2С	325	450	
Ст5	280	500–620	15–17	17ГС	345	490	

Отчет о работе

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Модель испытательной машины.
- 3 Эскиз образца до и после испытания.

4 Размеры образца до и после разрушения (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Начальные и конечные размеры образца

До испытания	После разрыва
Диаметр $d_0 =$ (мм)	Диаметр «шейки» $d_K =$ (мм)
Расчетная длина $l_0 =$ (мм)	Конечная длина расчетной части $l_K =$ (мм)
Площадь поперечного сечения $F_0 = \pi d_0^2 / 4 =$ (мм ²)	Площадь сечения «шейки» образца в месте разрыва $F_K = \pi d_K^2 / 4 =$ (мм ²)

5 Масштабы сил и деформаций истинной машинной диаграммы растяжения: $m_P =$; $m_{\Delta l} =$

Эскиз диаграммы с численными значениями усилий $P_{пц}$, P_T , P_B , P_P и деформаций $\Delta l_{ост}$ и $\Delta l_{упр}$ для испытываемого образца (рисунок 1.6).

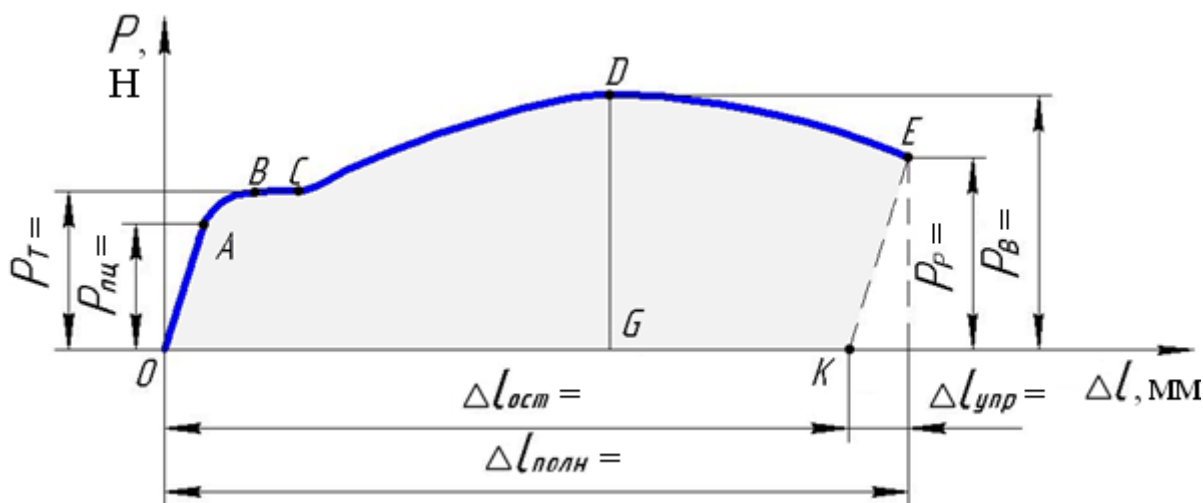


Рисунок 1.6 – Эскиз диаграммы растяжения

6 Величины нагрузок, Н (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Численные значения усилий растяжения, Н

Сила, соответствующая пределу пропорциональности, $P_{пц}$	Усилие, вызывающее текучесть материала, P_T	Максимальная сила, соответствующая пределу прочности, P_B	Усилие в момент разрыва P_P

7 Механические характеристики материала (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Механические характеристики материала

Механические характеристики <i>прочности</i> , МПа	Характеристики <i>пластичности</i> , %
Предел пропорциональности $\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0} =$	Относительное остаточное удлинение $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% =$
Предел текучести $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} =$	
Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0} =$	Относительное остаточное сужение поперечного сечения $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% =$
Истинное напряжение при разрыве $\sigma_P = \frac{P}{F_k} =$	

8 Примерная марка стали образца (по данным таблицы 1.1).

Контрольные вопросы

- 1 Какие характерные точки и участки имеет диаграмма растяжения пластичной стали?
- 2 Какие деформации называются упругими и остаточными?
- 3 Какие материалы при нормальных условиях принято считать пластичными? Хрупкими?
- 4 Что называется пределом пропорциональности?
- 5 Что называется физическим пределом текучести?
- 6 Что называется временным сопротивлением (пределом прочности) материала?
- 7 Какие механические характеристики материала определяют его способность пластически деформироваться?

Лабораторная работа № 2

**Определение модуля продольной упругости
и коэффициента поперечной деформации для стали**

Цель работы: определение величины упругих постоянных для стали – модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации.

Основные положения

Модуль продольной упругости или модуль упругости первого рода (модуль Юнга) и коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) являются основными механическими характеристиками упругих свойств материала и имеют большое практическое значение для расчета на *жесткость* элементов конструкций. Испытания по их определению ГОСТом не регламентируются.

Для большинства конструкционных материалов, при напряжениях σ , не превышающих предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ ($\sigma \leq \sigma_{\text{пц}}$), между нормальным напряжением в стержне и его деформацией ε растяжения, сжатия существует прямая пропорциональная зависимость (закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

где E – модуль продольной упругости материала (модуль Юнга); ε – относительная (отнесенная к начальной длине) продольная деформация:

$$\varepsilon = \Delta l / l. \quad (2.2)$$

Здесь Δl – абсолютная продольная деформация, т. е. изменение первоначальной длины l стержня.

Модуль продольной упругости E зависит от материала и характеризует его сопротивляемость упругим деформациям (жесткость) при растяжении, сжатии. Чем больше модуль продольной упругости, тем материал более жесткий, то есть, тем меньше он деформируется при одних и тех же напряжениях. Например, средняя величина модуля продольной упругости алмаза равна 1100 ГПа, титана 100 ГПа, свинца 18 ГПа, резины 0,007 ГПа. Для стали $E \approx 200$ ГПа.

Учитывая, что при растяжении-сжатии $\sigma = N/F$, а $\varepsilon = \Delta l / l$, закон Гука (2.1) может быть выражен в частном виде через абсолютное удлинение Δl стержня (участок OA на диаграмме растяжения стали, рисунок 1.3):

$$\Delta l = \frac{N l}{E F} = \frac{P l}{E F}, \quad (2.3)$$

где N – продольная сила (при действии одной растягивающей силы $N = P$); l – начальная расчетная длина; F – площадь поперечного сечения.

Исходя из (2.3), после определения абсолютного удлинения Δl образца с размерами l и F от нагрузки P , появляется возможность найти из *опыта* значение модуля продольной упругости E :

$$E = \frac{P l}{\Delta l F}. \quad (2.4)$$

Под действием осевой нагрузки образец меняет не только свою длину l , но и поперечные размеры, например, ширину b . Так, растяжение образца на величину Δl вызывает сокращение его поперечных размеров Δb . При сжатии поперечные размеры увеличиваются. Опытным путем установлено, что отношение относительной поперечной деформации $\varepsilon^* = \Delta b/b$ к относительной продольной $\varepsilon = \Delta l/l$ – есть величина постоянная для каждого материала. Эта постоянная называется *коэффициентом поперечной деформации* μ (коэффициентом Пуассона):

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \right|. \quad (2.5)$$

Для известных в практике изотропных материалов коэффициент μ находится в пределах от 0 до 0,5. Например, для стали $\mu \approx 0,3$; для резины – 0,47.

В данной лабораторной работе упругие постоянные E и μ определяются при растяжении стального образца *прямоугольного* поперечного сечения на разрывной машине модели P-5 (рисунок 2.1).

Машина предназначена для испытаний на растяжение и сжатие круглых и плоских образцов с максимальным усилием 5 тс (50 кН).



Рисунок 2.1 – Общий вид разрывной машины модели P-5

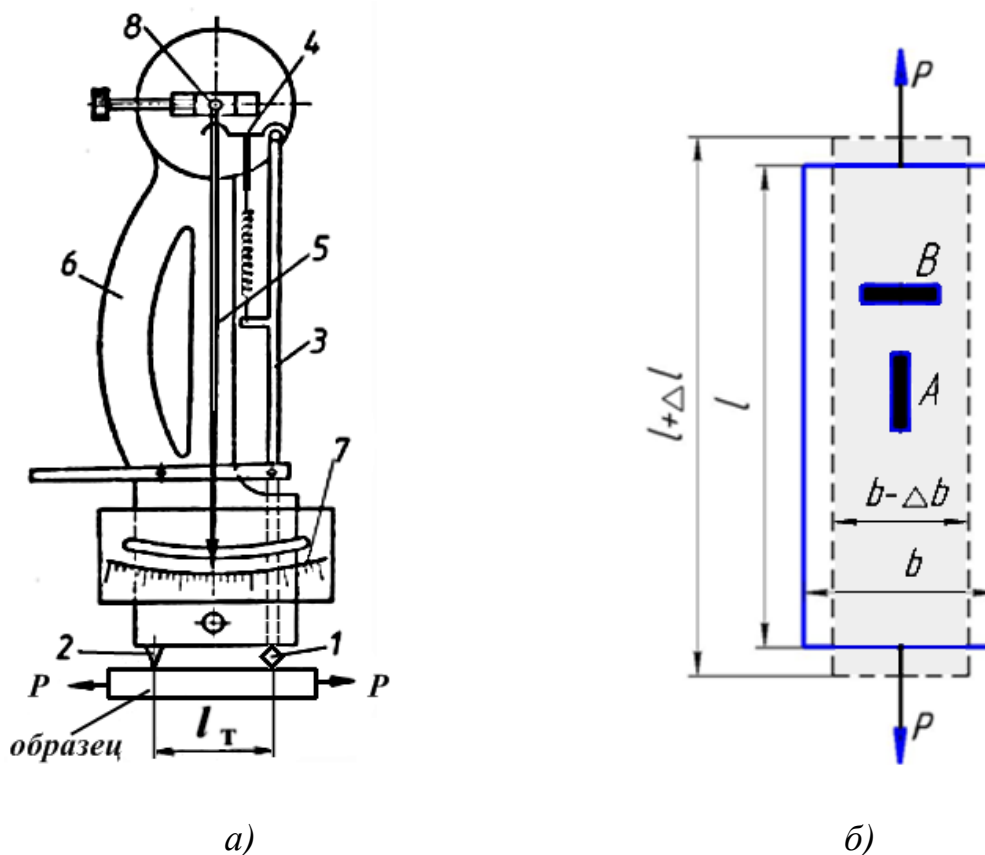
Основные узлы машины: станина, нагружающий механизм, рычажно-маятниковый силоизмерительный механизм, диаграммный аппарат.

Растяжение, сжатие образца производится либо от электродвигателя через редуктор либо вручную от рукоятки через цепную передачу (вращение рукоятки против хода часовой стрелки вызывает растяжение, по часовой – сжатие). Усилие от образца передается через рычаг и тягу на кривошип маятника, который отклоняется пропорционально усилию. Коротким плечом маятник перемещает рейку с винтовой нарезкой, вращающей стрелку силоизмерителя. Кроме того, для построения диаграммы растяжения, на рейке может быть закреплен ползун с самописцем, перемещение которого вдоль диаграммного барабана пропорционально нагрузке.

У маятника предусмотрен сменный груз и переменное плечо. Это позволяет использовать четыре диапазона нагрузок: 5 кН (500 кгс), 10 кН (1000 кгс), 25 кН (2500 кгс), 50 кН (5000 кгс). Необходимая шкала силоизмерителя устанавливается в соответствии с диапазоном нагрузок и видом деформирования (растяжение или сжатие). В данной работе использован диапазон нагрузки от 0 до 5000 кгс, шкала проградуирована в кгс (1 кгс \approx 10 Н).

Для измерения малых упругих деформаций образца: продольной Δl и поперечной Δb использовались *рычажные тензометры* типа ТР (тензометры Гу-

генбергера) (рисунок 2.2 а). Принцип их действия – механический с визуальным отсчетом по шкале. Размещение тензометров на образце и его размеры до и после растяжения показаны на рисунке 2.2 б.



а) Рисунок 2.2 – Схема рычажного тензомера а),
 расположение тензометров на образце б)

Тензомер крепится к испытываемому образцу при помощи струбины (не показанной на рисунке). Расстояние между нижним ребром подвижной ромбической призмы 1 и неподвижной опорой 2 называется начальной длиной или базой тензомера $l = l_T$. При присоединении специального удлинителя база может быть увеличена до любых размеров в пределах 50–1000 мм. Корпус прибора 6 вместе с призмой 1 воспринимает деформацию. Частью тензомера, увеличивающей деформацию, является рычаг 3, жестко прикрепленный к призме 1 и стрелка 5, соединенная с рычагом 3, тягой 4. Стрелка 5 верхним концом вращается вокруг шарнира 8. По шкале 7 производятся отсчеты.

При растяжении (сжатии) образца и изменении базы l_T на величину Δl произойдет поворот призмы 1 и вместе с ней рычага 3 на некоторый угол. Рычаг 3 при помощи тяги 4 повернет стрелку 5. При этом нижний конец стрелки 5 переместится по шкале 7 на величину ΔA , пропорциональную удлинению Δl . Зная коэффициент увеличения (соотношение плеч рычагов 3 и 5) и цену деления шкалы k , по разности отсчетов находится удлинение $\Delta l = \Delta A \cdot k$. Для применяемых в работе тензометров цена деления шкалы равна одной тысячной доле

миллиметра $\kappa = 10^{-3}$ мм, т. е. одному микрометру (1 мкм). Предел измерения 50 мкм, точность $\pm 0,5$ мкм. Для снижения ошибок при производстве отсчета нужно смотреть так, чтобы стрелка и ее изображение в зеркале совпадало.

Тензометр *A* предназначен для измерения продольной деформации, а тензометр *B* – поперечной (рисунок 2.2 б). Так как, с помощью тензометров определяются изменения длины и поперечного размера образца по отношению к базе l_T , то средние относительные деформации ε и ε^* будут соответственно равны:

$$\text{продольная } \varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_T}, \quad \text{поперечная } \varepsilon^* = \frac{\Delta b_{\text{ср}}}{l_T}, \quad (2.6)$$

где $\Delta l_{\text{ср}}$ – среднее приращение абсолютного удлинения, вызванного ступеню нагружения ΔP ; $\Delta b_{\text{ср}}$ – среднее приращение абсолютной поперечной деформации; l_T – база тензометров.

Порядок выполнения работы

1 Измерить поперечные размеры, т. е. ширину и толщину испытываемого образца прямоугольного сечения.

2 Вычислить площадь поперечного сечения F .

3 Определить величину силы $P_{\text{пц}}$, соответствующей пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$:

$$P_{\text{пц}} \leq \sigma_{\text{пц}} \cdot F. \quad (2.7)$$

Принять для стали $\sigma_{\text{пц}} = 200$ Н/мм², то есть 200 МПа (1 МПа = 1 Н/мм²).

4 Приложить предварительную силу P_0 для обжатия головок образца в захватах машины, устранения люфтов, зазоров в машине.

5 Зафиксировать величину этой силы, приняв ее за условный нуль. Записать начальные показания тензометров *A* и *B* в делениях прибора.

6 Произвести 3–4 нагружения образца равными ступенями ΔP и после каждой ступени записать показания обоих тензометров. Число ступеней нагружения берется с учетом выполнения условия (2.7).

Установка стрелок тензометров на нуль не нужна, т. к. в расчетах используются приращения показаний ΔA и ΔB .

7 После приложения последней силы, разгрузить образец до начальной нагрузки P_0 и проверить показания тензометров по данным первой записи.

8 Определить средние приращения $\Delta A_{\text{ср}}$ и $\Delta B_{\text{ср}}$ показаний тензометров:

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta A}{n}; \quad \Delta B_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta B}{n}; \quad (2.8)$$

где $\sum \Delta A$ и $\sum \Delta B$ – сумма приращений показаний тензометров A и B в делениях прибора; n – число ступеней нагружения.

9 Найти средние приращения абсолютного удлинения и поперечной деформации, вызванных ступенью нагружения ΔP , мм:

$$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot K, \quad (2.9)$$

$$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot K, \quad (2.10)$$

где K – цена деления шкалы тензометра.

10 Вычислить (формулы 2.6) относительную поперечную ε^* и относительную продольную ε деформации.

11 Определить величину модуля продольной упругости E , МПа:

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_T}{\Delta l_{cp} \cdot F}. \quad (2.11)$$

12 Вычислить численное значение коэффициента поперечной деформации μ (выражение (2.5)).

13 Полученные опытные значения модуля E и коэффициента μ сравнить с данными, приведенными в научно-технической литературе для стали:

$$E = (1,9 \div 2,2) \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \mu = 0,25 \div 0,33.$$

14 Построить график зависимости деформации Δl (в делениях продольного тензометра A) от нагрузки $A = f(P)$, приняв первое показание за условный нуль, подтверждающий закон Гука.

Отчет о работе

1 Наименование и цель работы.

2 Модель испытательной машины.

3 Размеры поперечного сечения образца: ширина =;
толщина =.

4 Площадь поперечного сечения $F =$.

5 База тензометров $l_T =$.

6 Цена деления шкалы тензометров $K =$.

7 Величина наибольшей силы $P_{пц}$ (в кгс), до которой выполняется закон Гука (при пределе пропорциональности для стали $\sigma_{пц} = 200$ МПа):

$$P_{пц} \leq \sigma_{пц} \cdot F = \quad .$$

8 Показания тензометров (таблица 2.1) и результаты опыта (таблица 2.2).

Таблица 2.1 – Показания тензометров

Нагрузка P ,		Степень нагрузки ΔP , Н	Показания тензометра A (в делениях)	Приращение показаний ΔA	Показания тензометра B (в делениях)	Приращение показаний ΔB
кгс	Н					
Средние значения показаний:			$\Delta A_{cp} =$		$\Delta B_{cp} =$	

Таблица 2.2 – Результаты опыта

Среднее приращение удлинения, мм	$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot k =$
Среднее приращение поперечной деформации, мм	$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot k =$
Относительная <i>продольная</i> деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{l_T} =$
Относительная <i>поперечная</i> деформация	$\varepsilon^* = \frac{\Delta b_{cp}}{l_T} =$
Коэффициент поперечной деформации μ	$\mu = \left \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \right =$
Модуль продольной упругости E , МПа	$E = \frac{\Delta P \cdot l_T}{\Delta l_{cp} \cdot F} =$

9 График зависимости продольной деформации от нагрузки $A = f(P)$.

10 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Какие свойства материала характеризует модуль продольной упругости?

2 Что нужно измерить опытным путем для определения модуля продольной упругости?

3 Как вычисляется величина наибольшей силы, до которой может быть нагружен образец при нахождении модуля E и коэффициента μ ?

4 Какие приборы используются для измерения продольной и поперечной деформации?

5 Что называется коэффициентом поперечной деформации? Запишите формулу для его определения.

6 Какие деформации, возникающие при осевом растяжении, больше: продольные или поперечные?

7 При проведении лабораторной работы были найдены следующие значения коэффициента поперечной деформации для стали: 0,15; 0,5; 0,28. Укажите, в каких случаях опыт был произведен неправильно.

8 Что называется базой рычажного тензометра ТР?

Лабораторная работа № 3

Испытание материалов на сжатие

Цель работы: определение механических характеристик пластичных, хрупких и анизотропных материалов при сжатии; изучение характера их разрушения.

Основные положения

Для испытания на сжатие металлов и их сплавов применяются образцы *цилиндрической формы*; для дерева, бетона и других аналогичных материалов – в виде кубиков.

Результаты испытаний на сжатие существенно зависят от условий проведения опыта. При сжатии очень важно обеспечить приложение силы точно по оси образца, т. к. несоосность приводит к его изгибу или перекашиванию. Большое значение имеют соотношение продольных и поперечных размеров образца и возникающие силы трения между его торцами и сжимающими плитами. Для длинных и тонких образцов возрастает вероятность потери их устойчивости и искривление. Применение же слишком коротких образцов нежелательно из-за возрастания влияния сил трения на контактных поверхностях (чем короче образец, тем сильнее влияние сил трения). В связи с этим для цилиндрических образцов рекомендуется соотношение высоты к диаметру h_0/d_0 в пределах 1–3. Силы трения искажают напряженное состояние образца и увеличивают сопротивление его разрушению. Повысить качество испытаний за счет снижения трения можно смазыванием торцов образца восковой, парафиновой, графитовой или другими смазками; с помощью полимерных прокладок. Применяются также образцы с конусообразной торцевой поверхностью и с кольцевой расточкой на торцах, заполненной густой смазкой.

Испытания на сжатие проводятся на универсальных машинах или специальных прессах необходимой грузоподъемности. В данной лабораторной работе используется универсальная машина грузоподъемностью 100 кН (10 тс) мо-

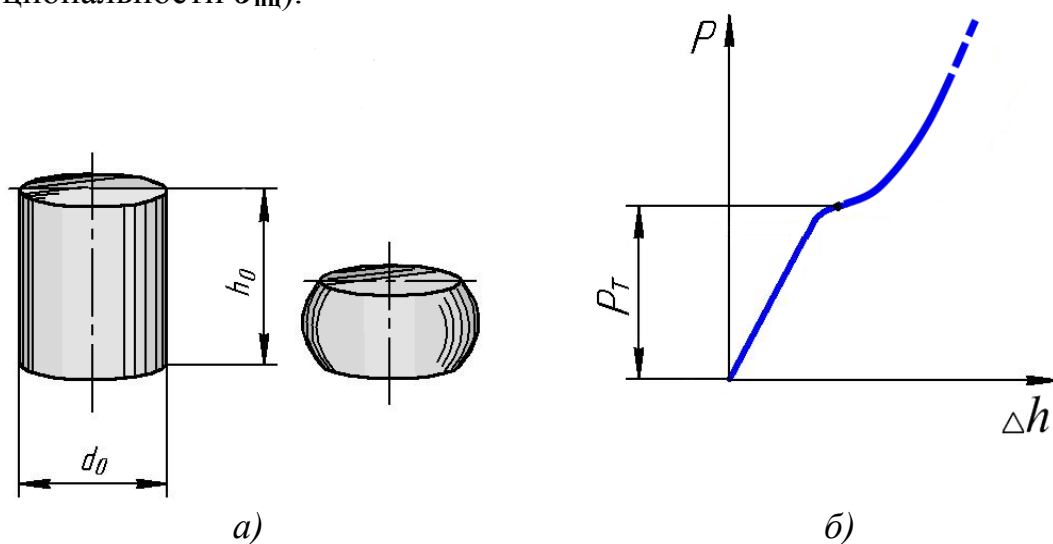
дели $P-10$ с записью зависимости укорочения образца от нагрузки $\Delta h = f(P)$. На этой же машине образец испытывался на растяжение (лабораторная работа №1).

Пластичные материалы (низкоуглеродистая сталь). Пластичные материалы *одинаково* сопротивляются растяжению и сжатию. Это значит, что для них численные значения модуля продольной упругости E , пределов пропорциональности $\sigma_{\text{пн}}$ и текучести $\sigma_{\text{Т}}$, полученные при растяжении, *равны* соответствующим величинам, найденным из опытов на сжатие. Пластичные материалы испытываются в основном на *растяжение*, а испытания на сжатие являются дополнением к нему.

Испытание низкоуглеродистой стали на статическое сжатие при нормальной температуре производится по ГОСТ 25.503-97. На рисунке 3.1 *а* показан вид образца до и после испытания, а на рисунке 3.1 *б* приведена диаграмма сжатия пластичной стали.

На диаграмме сначала наблюдается прямая линия, выражающая закон Гука. Затем при силе $P_{\text{Т}}$ (рисунок 3.1 *б*) отмечается *небольшой* участок текучести и дальнейшее возрастание остаточной деформации Δh по определенной зависимости от нагрузки. Уменьшаясь по высоте, образец увеличивается (особенно в центральной зоне) в поперечных размерах. Вследствие торцевых сил трения, направленных по радиусам от периферии к центру и ограничивающих поперечную деформацию, образец принимает бочкообразную форму.

Прочностная характеристика пластичного материала с площадкой текучести – это физический предел текучести $\sigma_{\text{Т}}$ (близкий по величине к пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пн}}$).



а) общий вид образца до и после испытания; б) диаграмма сжатия

Рисунок 3.1 – Образец и диаграмма сжатия пластичной стали

Для менее пластичных, а значит более хрупких материалов, площадка текучести на диаграмме сжатия отсутствует. У таких хрупкопластичных материалов определяют *условный* предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором относительное остаточное сжатие Δh образца достигает 0,2% от начальной высоты h_0 (лабораторная работа №1, рисунок 1.4). Хрупкопластичные материалы

лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Для них условный (или физический) предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2C}$ (или σ_{TC}) *больше*, чем при растяжении $\sigma_{0,2P}$ (σ_{TP}). К хрупкопластичным материалам с $\sigma_{0,2C} > \sigma_{0,2P}$ относятся некоторые легированные стали, подвергнутые закалке. Например, для легированной закаленной стали 30ХГС условный предел $\sigma_{0,2P} = 0,88 \sigma_{0,2C}$.

Образец при больших нагрузках (на специальном оборудовании) может быть сплюснен в тонкий диск без разрушения. Поэтому фактический предел прочности σ_{BC} , как напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей *разрушению*, для пластичных материалов при сжатии установить *не удастся*. В связи с этим определяют *условный* предел прочности $\sigma_{BCусл}$, соответствующий заданной величине остаточной деформации. В данной лабораторной работе, учитывая грузоподъемность машины Р-10 (до 10 тс) и размеры образца, испытание следует прекратить при его укорочении *на одну треть* от первоначальной высоты $\Delta h = h_0 / 3$, зафиксировав при этом *условную* силу $P_{BCусл}$.

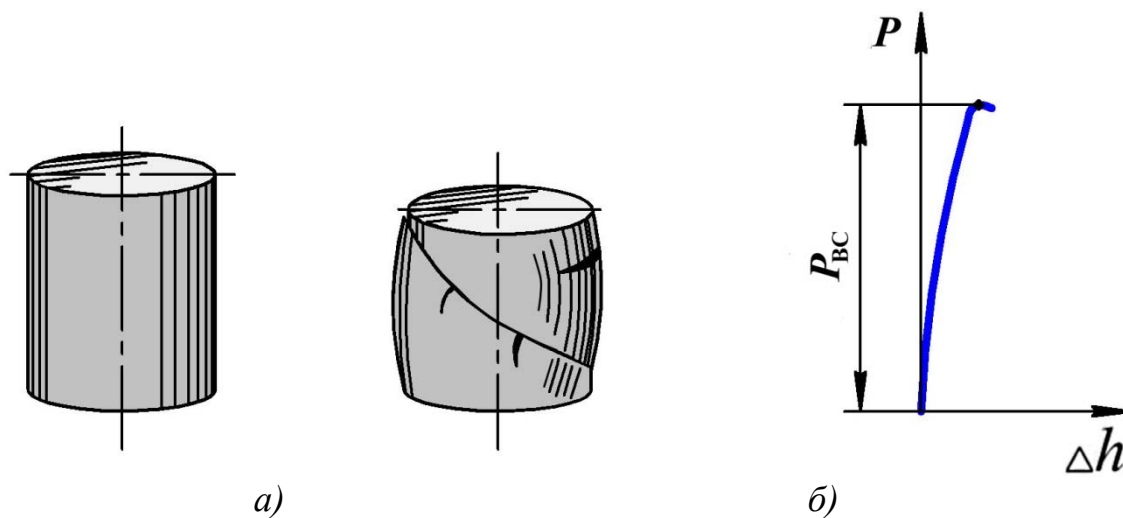
Хрупкие материалы (чугун). Хрупкие материалы значительно лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Например, у серого чугуна предел прочности на сжатие σ_{BC} (560–1000 МПа) в четыре, пять раз больше, чем на растяжение σ_{BP} (120–200 МПа). Поэтому такие материалы обычно используются для изготовления деталей, сжимающихся в процессе работы.

Испытания отливок из серого чугуна на сжатие осуществляется в соответствии с ГОСТ 27208-87. При этом применяются цилиндрические образцы диаметром от 10 до 25 мм с высотой, равной диаметру. Образцы из чугуна и других хрупких материалов *разрушаются* при незначительных продольных и поперечных деформациях, принимая слегка бочкообразную форму (рисунок 3.2 а). Разрушение и, как следствие, падение нагрузки происходит после достижения наибольшей величины сжимающей силы P_{BC} , соответствующей пределу прочности. Образец разрушается *внезапно* с образованием трещины под углом 45° к осевой линии. Именно в этом направлении действуют максимальные касательные напряжения. На рисунке 3.2 б показана диаграмма сжатия чугуна в виде линии малой кривизны без признаков текучести (в практических расчетах считают, что чугун подчиняется закону Гука).

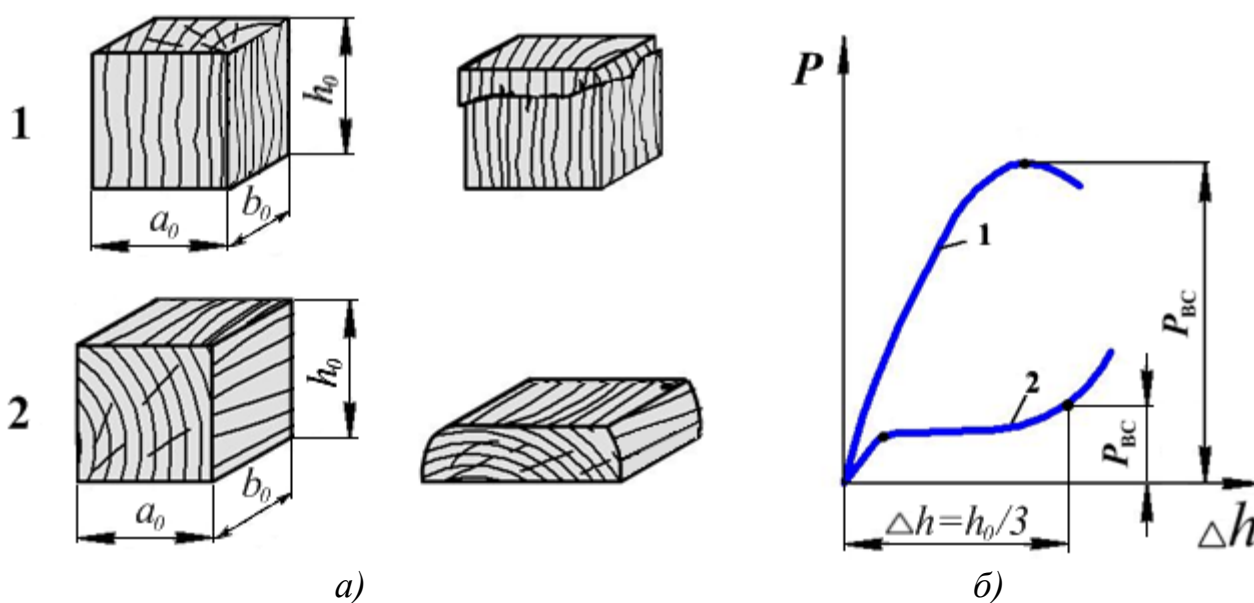
По максимальной силе P_{BC} определяется основная механическая характеристика прочности хрупких материалов – *предел прочности (временное сопротивление) σ_{BC}* .

Анизотропные материалы (дерево). Дерево является анизотропным материалом. Его механические свойства зависят от *направления* прикладываемой нагрузки по отношению к волокнам образца. Поэтому при испытаниях деревянные образцы сжимаются *вдоль* (ГОСТ 16483.23 – 73) и *поперек* волокон (ГОСТ 16483.11 – 72). Результаты испытаний и по прочности и по характеру разрушения при этом существенно различаются (рисунок 3.3 а). При испытании *вдоль* волокон деревянный кубик разрушается практически без деформаций. При достижении максимальной силы сжатия P_{BC} происходит разрушение – сдвиг слоев в плоскости, наклоненной под углом 45° – 60° (рисунок 3.3 а – 1) к

продольной оси образца и резкое падение нагрузки. Иногда наблюдается смятие торцов и продольные трещины. Таким образом, характер разрушения и диаграмма сжатия (рисунок 3.3 б; кривая 1) дерева *вдоль* волокон соответствуют сжатию *хрупких* материалов (сравните с диаграммой сжатия чугуна).



а) общий вид образца до и после испытания; б) диаграмма сжатия чугуна
Рисунок 3.2 – Образец и диаграмма сжатия чугуна



1 – дерево вдоль волокон; 2 – дерево поперек волокон
Рисунок 3.3 – Образцы а) и диаграмма сжатия б) дерева

Если нагрузку прикладывать *поперек* волокон, то дерево ведет себя подобно *пластичному* материалу. В этом направлении кубик сжимается легко и быстро. Сила сначала возрастает пропорционально деформации, а затем почти не меняется (рисунок 3.3 б; кривая 2). При отсутствии пороков (сучков, трещин) в древесине образец интенсивно уплотняется (спрессовывается) без види-

мых признаков разрушения за счет течения друг по другу кольцевых слоев дерева (рисунок 3.3 а – 2). Момент начала разрушения полностью спрессованного образца установить очень сложно. Поэтому условно за разрушающую нагрузку принимают такое значение силы $P_{ВС}$, при которой кубик сжимается на одну треть своей начальной высоты $\Delta h = h_0/3$.

Порядок выполнения работы

Получить от преподавателя образцы: стальной, чугунный, два деревянных. На одном деревянном образце показать направление вдоль волокон, а на втором – поперек волокон.

Определить начальные размеры образцов. Измерение производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,1 мм. За окончательный результат принимается среднее арифметическое двух измерений. Вычислить площади поперечных сечений F_0 с округлением до 0,1 мм².

Сжатие образца из пластичной стали

1 Закрепить миллиметровую бумагу на барабан диаграммного аппарата. Установить наибольшую шкалу нагрузки силоизмерителя от 0–10 тс.

2 Поставить испытываемый образец на нижнюю опорную плиту.

3 Включить машину и плавно сжимать образец.

4 При испытании наблюдать за стрелкой силоизмерителя. Кратковременная остановка стрелки или замедление её движения указывает на достижение силы P_T , соответствующей физическому пределу текучести.

Если на диаграмме отсутствует площадка текучести и не зафиксирована остановка стрелки силоизмерителя, то определяют силу $P_{0,2}$, соответствующую условному пределу текучести (формула 1.3, рисунок 1.4).

5 При сжатии образца на одну треть от начальной высоты h_0 ($\Delta h = h_0/3$) отметить *условную* нагрузку, соответствующую пределу прочности $P_{ВС\text{ усл}}$.

6 Зарисовать диаграмму, внешний вид образца до и после испытания.

7 По найденным усилиям вычислить, соответственно, физический предел текучести σ_T (или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$):

$$\sigma_T = P_T / F_0 \text{ или } (\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0) \quad (3.1)$$

и *условный* предел прочности на сжатие $\sigma_{ВС\text{ усл}}$:

$$\sigma_{ВС\text{ усл}} = P_{ВС\text{ усл}} / F_0, \quad (3.2)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания.

Сжатие чугунного образца

При сжатии образца из хрупких материалов:

- испытания проводятся до *разрушения* образца;
- максимальная сила, соответствующая пределу прочности при сжатии P_{BC} , фиксируется во время опыта по шкале силоизмерителя;
- из механических характеристик вычисляется только предел прочности материала σ_{BC} :

$$\sigma_{BC} = P_{BC} / F_0. \quad (3.3)$$

Сжатие деревянных образцов вдоль и поперек волокон

1 Образцы установить на опорную плиту машины. Один образец расположить так, чтобы действие сжимающей силы было направлено вдоль волокон. Второй – испытывать поперек волокон.

2 При сжатии вдоль волокон образец подвергнуть сжатию *до разрушения* (в момент разрушения наблюдается падение нагрузки). Зафиксировать максимальную силу P_{BC} , соответствующую пределу прочности.

3 При сжатии дерева поперек волокон условно за разрушающую нагрузку принимается сила P_{BC} , при которой высота образца h_0 уменьшается на одну треть ($\Delta h = h_0 / 3$). Величина Δh фиксируется с помощью линейки, закрепленной на колонне машины. При испытании использовать шкалу 0–2 тс.

4 Определить соответствующие пределы прочности дерева σ_{BC} при сжатии вдоль и поперек волокон по формуле (3.3).

Отчет о работе

1 Название и цель работы.

2 Модель испытательной машины.

3 Размеры образцов и результаты испытаний (таблица 3.1).

4 Эскизы образцов до и после испытания, характер их деформации и разрушения.

5 Диаграммы сжатия для стали, чугуна, дерева вдоль и поперек волокон.

В отчете должны быть приведены формулы и вычисления результатов испытаний для таблицы 3.1.

Контрольные вопросы

1 Какие механические характеристики прочности определяются при испытании на сжатие?

2 Какие существуют рекомендации по соотношению продольных и поперечных размеров цилиндрических образцов при испытании на сжатие?

3 Чем объясняется бочкообразная форма сжатого образца?

Таблица 3.1 – Размеры образцов и результаты испытаний

Размеры образцов и результаты испытаний	Материал			
	Сталь	Чугун	Дерево	
			вдоль волокон	поперек волокон
Высота образцов h_0 , мм				
Размеры поперечного сечения, мм	$d_0 =$	$d_0 =$	$a_0 =$ $b_0 =$	$a_0 =$ $b_0 =$
Площадь поперечного сечения образца F_0 , мм ²				
Нагрузка P_T , соответствующая физическому пределу текучести (или условному $P_{0,2}$), Н		–	–	
Нагрузка P_{BC} , соответствующая пределу прочности (или условному $P_{BC\text{ усл}}$), Н				
Физический предел текучести σ_T (или условный – $\sigma_{0,2}$), МПа		–	–	
Предел прочности σ_{BC} (или условный – $\sigma_{BC\text{ усл}}$), МПа				

4 Какой вид имеет диаграмма сжатия образца из низкоуглеродистой стали?

5 Каков характер разрушения и вид диаграммы сжатия чугунного образца?

6 В чем особенность испытаний на сжатие анизотропного материала типа древесины? Как влияет, по вашему мнению, влажность древесины на её прочность?

7 Какой вид имеют диаграммы сжатия древесины вдоль и поперек волокон?

8 Как в опыте определяется разрушающая нагрузка при сжатии древесины поперек волокон?

Лабораторная работа № 4

Определение модуля сдвига при кручении

Цель работы: определение величины модуля сдвига для стали и опытная проверка закона Гука при кручении.

Основные сведения

Методика проведения испытаний на кручение регламентируется ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытания на кручение».

Для испытания на кручение чаще всего используют цилиндрические образцы диаметром 10 мм с длиной рабочей части 50 или 100 мм (такие образцы называют нормальными). Но ГОСТ 3565-80 допускает проводить испытания образцов, пропорциональных нормальным, а также трубчатых образцов.

Кручением называется такой вид нагружения стержня, при котором в его поперечных сечениях возникает только один внутренний силовой фактор – крутящий момент M_x (или M_k). В основе работы материала при кручении лежит деформация *сдвига*, которая характеризуется углом сдвига γ и касательными напряжениями τ . В пределах упругих деформаций (при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности $\tau_{пл}$) напряжения в стержне прямо пропорциональны относительному углу сдвига γ (закон Гука при сдвиге):

$$\tau = G \gamma, \quad (4.1)$$

где G – упругая постоянная материала, называемая модулем сдвига или модулем упругости второго рода, характеризующая жесткость материала при сдвиге (и кручении). Чем больше G , тем меньше деформируется материал при одних и тех же напряжениях. Например, средняя величина модуля сдвига для стали равна 80 ГПа, для алюминиевых сплавов 27 ГПа, титановых – 42 ГПа и т. д.

В поперечных сечениях стержня, касательные напряжения τ распределяются по сечению вдоль радиуса по линейному закону

$$\tau = \frac{M_x \cdot \rho}{J_p}, \quad (4.2)$$

где ρ – расстояние от центра тяжести сечения (полюса) до точки, в которой определяется напряжение; J_p – полярный момент инерции сечения, m^4 . Для круглого сечения диаметром d :

$$J_p = \pi d^4 / 32. \quad (4.3)$$

В центре окружности (при $\rho = 0$) напряжения равны нулю и максимального значения достигают в точках, наиболее удаленных от центра, т. е. в точках контура при $\rho_{max} = d/2$:

$$\tau_{max} = \frac{M_x \rho_{max}}{J_p} = \frac{M_x}{W_p}, \quad (4.4)$$

где $W_p = J_p / \rho_{max}$ – полярный момент сопротивления сечения, м³.

Для сечения круглой формы момент сопротивления равен:

$$W_p = \pi d^3 / 16. \quad (4.5)$$

Угол поворота одного поперечного сечения относительно другого называется углом закручивания φ . В пределах упругости угол закручивания, выраженный в радианах, связан с крутящим моментом линейной зависимостью (закон Гука):

$$\varphi = \frac{M_x l}{G J_p}, \quad (4.6)$$

где l – расстояние между двумя рассматриваемыми сечениями.

Из закона Гука (4.6) следует, что для нахождения модуля сдвига опытным путем G^0 достаточно задать величину крутящего момента M_x и измерить соответствующий ему угол закручивания φ при известных значениях l и J_p :

$$G^0 = \frac{M_x l}{\varphi J_p}. \quad (4.7)$$

При определении значения модуля сдвига G из теории используется зависимость между тремя упругими постоянными для изотропных материалов:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (4.8)$$

где E , μ – механические характеристики упругих свойств материала при растяжении-сжатии: модуль продольной упругости и коэффициент поперечной деформации, соответственно (см. лабораторную работу № 2).

Работа проводится на машине модели КМ-50-1 (рисунок 4.1), предназначенной для испытания образцов из металла на кручение с наибольшим скручивающим моментом до 500 Н·м (50 кгс·м).

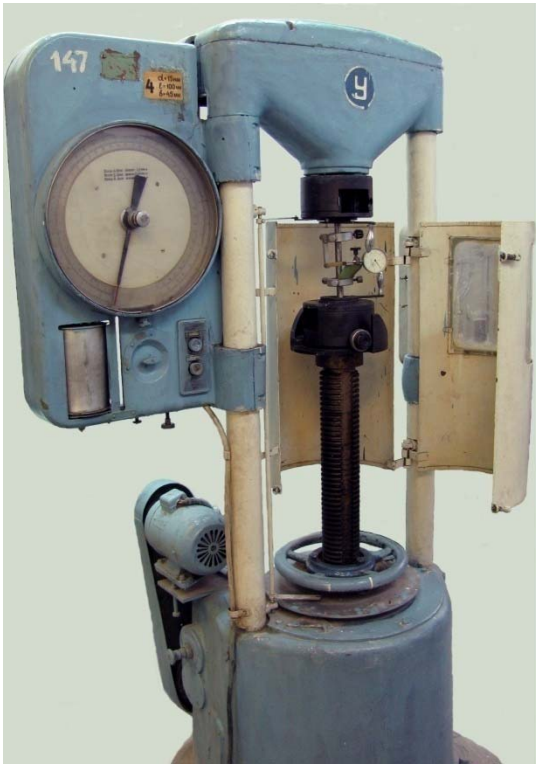


Рисунок 4.1 – Общий вид машины для испытания на кручение КМ-50-1

Все узлы машины смонтированы на станине с двумя вертикальными колоннами. Передача вращения от нижнего захвата к верхнему осуществляется с помощью электродвигателя или вручную с помощью цепной передачи (при вращении рукоятки по часовой стрелке). Величина создаваемого момента фиксируется с помощью моментоизмерителя. Он состоит из шкалы с рабочей и контрольной стрелками, маятника со сменными грузами, рычага, рейки с направляющими роликами и шестерней. Значение передаваемого момента прямо пропорционально углу отклонения рабочей стрелки. Машина снабжена диаграммным устройством, которое позволяет получить диаграмму зависимости величины крутящего момента от угла закручивания.

До начала испытания выбирают шкалу нагружения, устанавливая на маятнике соответствующий груз (шкала

A – один груз; шкала *B* – два груза и шкала *B* – три груза).

Для замера малых углов закручивания используется *угломер* С.В. Бояршинова (*экстензометр*) – рисунок 4.2 *а*. Кольца 1 и 2 с жесткими планками неподвижно закреплены на образце на расстоянии расчетной длины *l*. При скручивании одно кольцо повернется относительно другого. Вследствие поворота планка на кольце 1, будет перемещать стержень индикатора часового типа 3, установленного на планке кольца 2. При этом перемещение стержня индикатора Δ пропорционально углу закручивания φ (в силу малости этого угла), рисунок 4.2 *б*.

Отношение усредненных показаний индикатора (с учетом цены деления *κ*) на ступень нагрузки $\Delta n \kappa$ к расстоянию от оси испытываемого образца до индикатора *b* и является средним углом закручивания в радианах:

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_{\text{ср}} \kappa}{b}. \quad (4.9)$$

Порядок выполнения работы

1 Определить размеры образца: диаметр *d* и расчетную длину *l*; расстояние от оси образца до индикатора *b*; узнать цену деления шкалы индикатора *κ*.

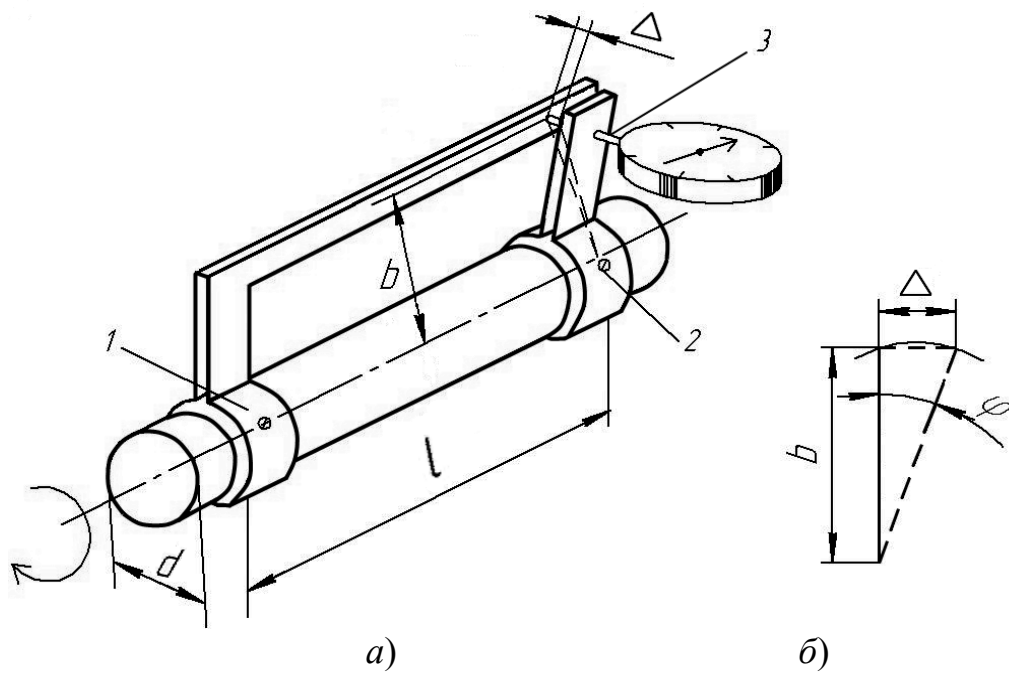


Рисунок 4.2 – Схема экстензометра

2 Вычислить величину момента $M_{x \text{ ппц}}$, до которого выполняется закон Гука:

$$M_{x \text{ ппц}} \leq \tau_{\text{ппц}} \cdot W_p, \quad (4.10)$$

где $\tau_{\text{ппц}}$ – предел пропорциональности материала образца (принять для стали $\tau_{\text{ппц}} = 100$ МПа). Учитывая, что $1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$ и $1 \text{ кгс} \approx 10 \text{ Н}$, получите размерность значения нагрузки $M_{x \text{ ппц}}$ в единицах шкалы моментометра применяемой испытательной машины, т. е. в кгс·м.

3 Приложить к образцу предварительный скручивающий момент и установить индикатор угломера на нулевое деление.

4 Нагрузить образец равными ступенями ΔM_x (не превышая $M_{x \text{ ппц}}$), каждый раз фиксируя показания индикатора.

5 Вычислить среднеарифметическое приращение угла закручивания по выражению (4.9).

6 Определить величину модуля сдвига G^0 (МПа) из опыта (формула 4.7). Принять $M_x = \Delta M_x$; $\varphi = \varphi_{\text{ср}}$.

7 Построить график зависимости $\varphi = f(M_x)$ и убедиться, что в пределах точности проводимого опыта деформация образца подчиняется закону Гука.

8 Рассчитать теоретическое значение модуля сдвига G (формула 4.8). Принять для стали величины модуля $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициента $\mu = 0,25$.

9 Сопоставить опытные и теоретические величины модуля сдвига, вычислив погрешность.

Отчет о работе

- 1 Название и цель работы.
- 2 Модель испытательной машины.
- 3 Диаметр образца $d =$.
 Расчетная длина $l =$.
 Расстояние от оси образца до индикатора $b =$.
 Цена деления шкалы индикатора $\kappa =$.
- 4 Полярный момент сопротивления сечения, мм³:

$$W_p = \pi d^3 / 16 = .$$

- 5 Наибольший скручивающий момент $M_{x\text{ пп}}$ (кгс·м), до которого деформация образца следует закону Гука (принять $\tau_{\text{пп}} = 100$ МПа):

$$M_{x\text{ пп}} \leq \tau_{\text{пп}} \cdot W_p = .$$

- 6 Результаты опыта (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты опыта

Крутящий момент M_x		Степень момента ΔM_x	Показания индикатора n	Степень показаний Δn	Угол закручивания $\varphi = \frac{n\kappa}{b}$
кгс·м	Н·мм	Н·мм	в делениях прибора		рад
Среднее значение $\Delta n_{\text{ср}} =$					

- 7 Усредненный угол закручивания $\varphi_{\text{ср}}$, рад:

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_{\text{ср}} \kappa}{b} = .$$

- 8 Полярный момент инерции поперечного сечения образца, мм⁴:

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32} = .$$

- 9 Опытное значение G^0 модуля сдвига, МПа:

$$G^0 = \frac{\Delta M_x l}{\varphi_{\text{ср}} J_p} =.$$

10 Величина G (МПа), полученная из теории ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,25$)

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} =.$$

11 Погрешность опыта:

$$\delta = \frac{G - G^0}{G} \cdot 100\% =.$$

12 График зависимости угла закручивания от крутящего момента $\varphi = f(M_x)$.

13 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Какое напряжение возникает в поперечных сечениях стержня при кручении? В каких точках сечения напряжение достигает наибольшей величины?

2 По каким формулам определяются полярные моменты инерции и сопротивления для круглого поперечного сечения?

3 Как связаны между собой крутящий момент и угол закручивания в области упругих деформаций?

4 Запишите условие применимости закона Гука при кручении.

5 Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

6 Во сколько раз изменится угол закручивания, если диаметр стержня уменьшить вдвое при прочих одинаковых условиях?

7 Запишите формулу взаимосвязи между упругими постоянными G , E и μ для изотропных материалов.

8 С помощью какого прибора производится замер угла закручивания? Как он работает?

Лабораторная работа № 5

Определение нормальных напряжений в поперечном сечении балки при изгибе

Цель работы: определить нормальные напряжения в поперечном сечении двутавровой двухопорной балки при плоском прямом изгибе.

Основные положения

При изгибе по высоте поперечного сечения балки образуются две зоны – *растяжения* и *сжатия*, разделяемые нейтральным слоем. При этом одни про-

дольные волокна удлиняются, другие – укорачиваются. Продольные волокна нейтрального слоя искривляются, но не меняют своей длины. Линия пересечения нейтрального слоя с плоскостью поперечного сечения называется нейтральной осью (*н. о.*). Нейтральная ось проходит через центр тяжести сечения.

Из *теории* известно, что при изгибе нормальные напряжения σ определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{J_{н.о.}} \cdot Y, \quad (5.1)$$

где M – изгибающий момент в том сечении балки, где вычисляется напряжение (для нахождения M необходимо применить метод сечений); Y – расстояние от рассматриваемой точки поперечного сечения до нейтральной оси; $J_{н.о.}$ – осевой момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси.

Формула (5.1) применима только в области закона Гука при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности $\sigma_{пк}$ материала балки.

Наибольшие (по модулю) нормальные напряжения σ_{max} возникают в *опасных* точках наиболее удаленных от нейтральной оси при $Y = Y_{max}$:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{J_{н.о.}} \cdot Y_{max} = \frac{M}{W_{н.о.}}, \quad (5.2)$$

где $W_{н.о.} = \frac{J_{н.о.}}{Y_{max}}$ – осевой момент сопротивления сечения относительно нейтральной оси.

Для определения нормальных напряжений из *опыта* σ^0 используется закон Гука:

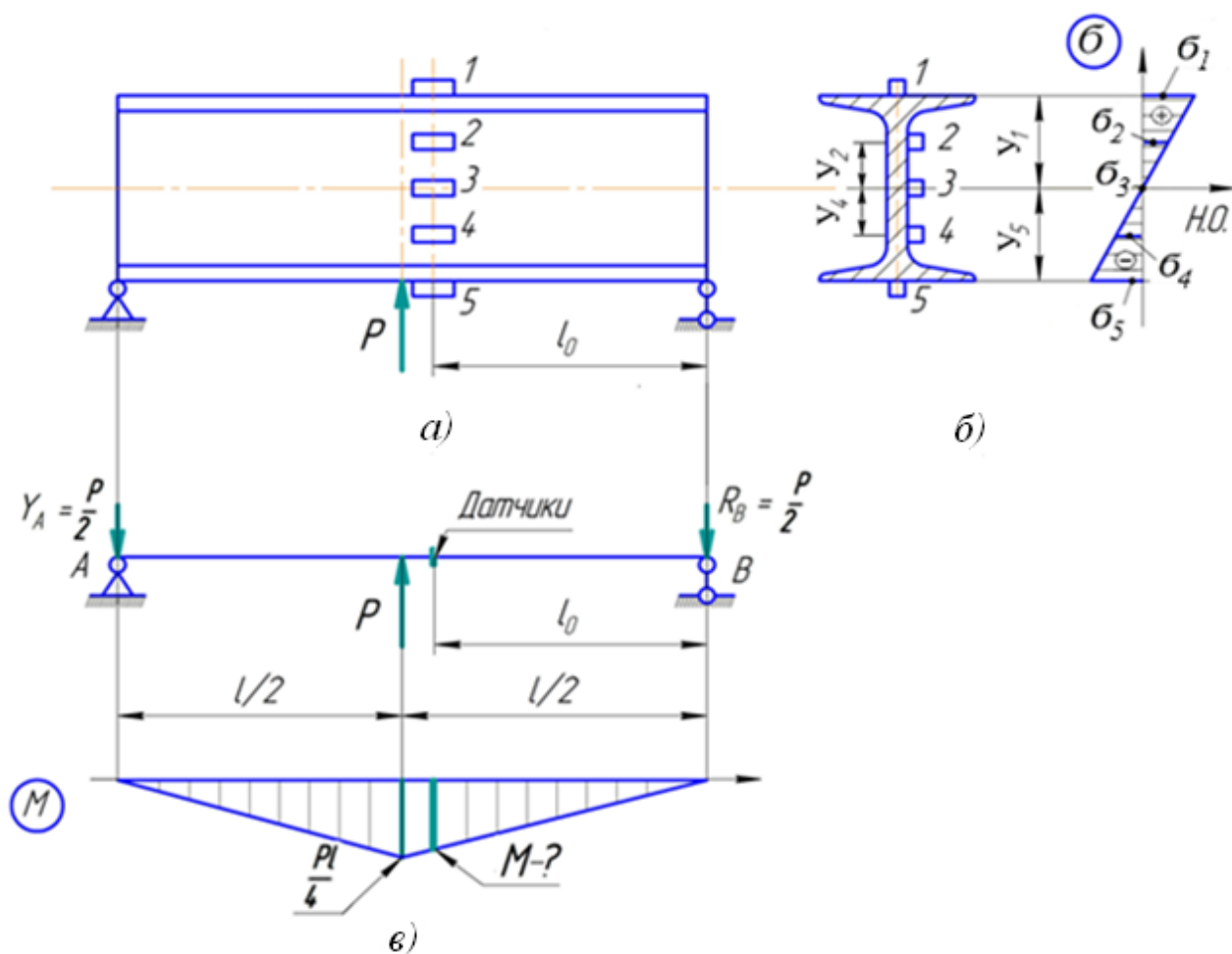
$$\sigma^0 = E\varepsilon, \quad (5.3)$$

где E – модуль продольной упругости материала балки; ε – относительная деформация продольных волокон.

Измерение относительной продольной деформации ε основано на методе *электротензометрирования*. Чувствительным элементом при этом методе является *тензорезистор* или *датчик омического сопротивления*. Проволочный датчик омического сопротивления изготавливается из тонкой, диаметром 15–30 мкм, проволоки, уложенной для увеличения чувствительности в виде петель одинаковой длины. Длина петли называется *базой* датчика (наиболее часто используются базы 5, 10 и 20 мм). Материалом проволоки являются сплавы с высоким удельным сопротивлением: константан (60% Cu; 40% Ni), нихром (80% Ni; 20% Cr), манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni) и т. п. Датчик закреплен на бумажной основе и наклеивается на испытуемый образец. При растяжении или сжатии продольных волокон изогнутого образца растягивается или сжимается и

тензодатчик. И, как следствие, прямо пропорционально деформации меняется его омическое сопротивление (растяжение проволоки вызывает увеличение сопротивления, сжатие – уменьшение). Это изменение сопротивления тензорезистора регистрируется при помощи прибора с мостовой схемой и используется для определения деформации продольных волокон ϵ образца.

В испытываемой балке двутавровой (ГОСТ 8239-89) поперечного сечения, проволочные датчики омического сопротивления наклеены на расстоянии l_0 от ее правой опоры в *пяти* точках по высоте сечения. Расположение датчиков и эпюра распределения нормальных напряжений σ по высоте сечения показаны на рисунке 5.1 а, б.



- а) схема расположения датчиков,
- б) эпюра изменения нормальных напряжений по высоте сечения,
- в) расчетная схема балки и эпюра изгибающего момента

Рисунок 5.1 – Двутавровая балка и эпюра напряжений

В качестве регистрирующего прибора используется измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1 или весоизмеритель *WeiHeng*. При нагружении стальной

балки равными ступенями снимают показания прибора и вычисляют опытные значения напряжений σ^0 для всех пяти датчиков:

$$\sigma^0 = E\varepsilon = E\Delta A_{cp}m \quad (5.4)$$

или

$$\sigma^0 = \Delta A_{cp}m, \quad (5.5)$$

где ΔA_{cp} – среднее приращение показаний измерителя по данному датчику; m – коэффициент чувствительности регистрирующего прибора. Для измерителя деформаций ИДЦ-1 этот коэффициент равен $m = 10^{-5}$, для весоизмерителя *Wei-Heng* этот коэффициент равен $m = 7,835$ МПа;

E – модуль продольной упругости (для стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа).

Для фиксации величины прикладываемой силы P применяется *динамометр на сжатие* типа ДОСМ и тарировочная таблица соответствия значений силы и числа делений индикатора часового типа.

Порядок выполнения работы

1 Определить необходимые размеры:

- пролет балки l ;
- расстояние от опоры до сечения с тензорезисторами l_0 ;
- номер двутавра (номер равен высоте профиля в сантиметрах);
- геометрические характеристики двутаврового сечения $J_{н.о.} = J_x$ и $W_{н.о.} = W_x$ (ГОСТ 8239-89);
- расстояния от нейтральной оси до датчиков Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 (рисунок 5.1 б).

2 Установить область применения формул (5.1) и (5.2), ограничивая возникающие напряжения, пределом пропорциональности $\sigma_{пц}$:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{н.о.}} \leq \sigma_{пц} \quad (5.6)$$

для предлагаемой схемы $M_{max} = Pl / 4$ (рисунок 5.1 в). Тогда величина допускаемой силы $[P]$, до которой выполняется закон Гука, будет равна:

$$[P] = \frac{4\sigma_{пц}W_{н.о.}}{l}. \quad (5.7)$$

Принять для материала балки предел пропорциональности $\sigma_{пц} = 200$ МПа.

3 Приложить к балке предварительную нагрузку, установить индикатор нагружающего устройства (динамометра) на нулевое деление. Снять показания прибора по тензорезисторам 1, 2, 3, 4 и 5.

4 Последовательно, увеличивая нагрузку равными ступенями ΔP (не превышая $[P]$), снова записать данные тензостанции по всем пяти датчикам.

5 Для каждого тензорезистора найти среднее приращение показаний прибора ΔA_{cp} на ступень нагрузки и по выражению 5.4 (или 5.5) вычислить опытные значения напряжений σ^o (МПа) в пяти контролируемых точках сечения.

6 Для расчетной схемы балки (рисунок 5.1 в) определить момент M в том сечении, где измеряются напряжения, т. е. наклеены датчики. При этом принять $P = \Delta P$.

7 Используя найденный изгибающий момент M , рассчитать по формуле (5.1) теоретические величины напряжений σ .

8 Построить эпюру изменения опытных σ^o и теоретических σ нормальных напряжений по высоте сечения балки.

Отчет о работе

1 Название и цель работы.

2 Размеры балки и геометрические характеристики сечения:

- пролет балки $l =$;
- расстояние от правой опоры до сечения, где наклеены датчики $l_0 =$;
- профиль балки – двутавр №;
- момент инерции двутаврового сечения $J_{н.о.} =$;
- момент сопротивления сечения $W_{н.о.} =$;
- ординаты точек $Y_1 =$; $Y_2 =$; $Y_3 =$; $Y_4 =$; $Y_5 =$.

3 Максимальная нагрузка $[P]$, до которой напряжения не превышают предела пропорциональности $\sigma_{ну} = 200$ МПа, т. е. применима формула (5.1):

$$[P] = \frac{4\sigma_{ну}W_{н.о.}}{l} =$$

4 Результаты опыта (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Показания прибора

Нагрузка, кН		Отсчеты (в делениях прибора) в датчиках									
		1		2		3		4		5	
P	ΔP	A_1	ΔA_1	A_2	ΔA_2	A_3	ΔA_3	A_4	ΔA_4	A_5	ΔA_5
Среднее: $\Delta A_{1cp} =$		$\Delta A_{2cp} =$		$\Delta A_{3cp} =$		$\Delta A_{4cp} =$		$\Delta A_{5cp} =$			

5 Величины опытных значений нормальных напряжений σ^o в датчиках 1, 2, 3, 4, 5 (формулы 5.4 или 5.5):

$$\sigma_1^o = \quad ;$$

$$\sigma_2^o = \quad ;$$

$$\sigma_3^o = \quad ;$$

$$\sigma_4^o = \quad ;$$

$$\sigma_5^o = \quad .$$

6 Схема нагружения и расчетная схема балки с эпюрой изгибающего момента (рисунок 5.1 а, в).

7 Величина изгибающего момента M (рисунок 5.1 в) в том сечении, где измеряются напряжения, т. е. наклеены датчики (принять $P = \Delta P$):

$$M = .$$

8 Теоретические значения напряжений σ в 5-ти точках сечения с найденным моментом M (формула (5.1)). Учтите, что $1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$.

$$\sigma_1 = \quad ;$$

$$\sigma_2 = \quad ;$$

$$\sigma_3 = \quad ;$$

$$\sigma_4 = \quad ;$$

$$\sigma_5 = \quad .$$

9 Эпюры изменения опытных σ^o (пунктирная линия) и теоретических σ (сплошная линия) напряжений по высоте сечения балки (рисунок 5.1 б).

10 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Как деформируются продольные волокна балки при изгибе?

2 Что называется нейтральным слоем балки, нейтральной осью ее поперечного сечения?

3 По какой формуле рассчитываются нормальные напряжения в точках поперечного сечения стержня при изгибе?

4 Всегда ли применима формула (5.1) для вычисления нормальных напряжений при изгибе?

5 Чему равны нормальные напряжения в поперечных сечениях балки на нейтральной оси?

6 Укажите взаимосвязь между осевыми моментами инерции и сопротивления поперечного сечения.

7 С помощью какого метода измеряют деформации продольных волокон балки при проведении опыта?

8 Какую упругую постоянную материала необходимо знать, чтобы определить нормальные напряжения по измеренным деформациям?

Лабораторная работа № 6

Испытание на устойчивость сжатых стержней

Цель работы: исследовать устойчивость стержня при осевом сжатии, определить критическую силу, проверить формулу Эйлера.

Основные положения

Из теоретической механики известно, что равновесие твёрдых тел может быть *устойчивым*, *неустойчивым* и *безразличным*. Например, шар, расположенный на дне вогнутой сферы, находится в устойчивом равновесии (рисунок 6.1 а), поскольку после отклонения от положения равновесия он возвращается в исходное положение, как только исчезает причина, вызвавшая это отклонение. Очевидно, что тот же шар, расположенный на вершине выпуклой сферы, находится в неустойчивом равновесии (рисунок 6.1 б). А при положении шара на плоскости, он находится в безразличном равновесии (рисунок 6.1 в).

По аналогии с предметом «Статика» различают устойчивое, неустойчивое и критическое деформированное состояние тела. Так, в лабораторной работе №3 при испытании материалов на сжатие обращалось внимание на то, что испытываемые образцы не должны быть слишком длинными, во избежание их изгиба. В то же время, в инженерной практике всё чаще используются работающие на сжатие конструкции с тонкими стенками и большими длинами (что экономически выгодно). К ним можно отнести длинномерные стойки, упоры, колонны, стержни ферм, штоки, стенки сосудов.

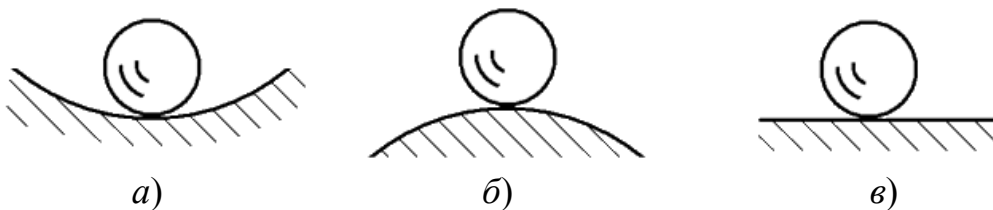


Рисунок 6.1 – Устойчивое а), неустойчивое б) и безразличное в) равновесие тела

Обеспечение устойчивости конструкций входит в перечень трёх основных задач «Сопrotивления материалов»: 1) расчёт на *прочность*; 2) расчёт на *жесткость*; 3) расчёт на *устойчивость*.

Устойчивое деформированное состояние характеризуется тем, что при любом бесконечно малом отклонении от него внутренние усилия препятствуют увеличению этого отклонения. И после снятия нагрузки, вызвавшей это отклонение, тело возвращается в исходное состояние.

Неустойчивое деформированное состояние характеризуется тем, что, хотя бы при одном из возможных бесконечно малых отклонений от него, внутренние усилия способствуют дальнейшему увеличению этого отклонения. Отклонение возрастает даже после снятия нагрузки, вызвавшей его.

Между устойчивым и неустойчивым деформированными состояниями существует так называемое *критическое* деформированное состояние тела. Оно характеризуется тем, что при бесконечно малом отклонении от него существует состояние равновесия между внешними нагрузками, действующими на тело, и внутренними усилиями, возникающими в нём. А после снятия нагрузки, вызвавшей это отклонение, отклонение остаётся неизменным (не исчезает и не увеличивается).

В работе исследуется *продольный изгиб*, т. е. потеря устойчивости прямолинейной формы равновесия при центральной сжатии прямого стержня. Наименьшее значение центрально приложенной сжимающей силы, при котором прямолинейная форма равновесия стержня уже не является устойчивой, называется *критической силой* $P_{кр}$.

Величина критической силы для сжатого стержня большой гибкости определяется по формуле Л. Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(\mu\ell)^2}, \quad (6.1)$$

где E – модуль продольной упругости материала стержня;

J_{min} – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня;

ℓ – рабочая длина стержня (расстояние между опорами);

μ – коэффициент приведения длины, учитывающий способ закрепления стержня.

Из формулы (6.1) следует, что потеря устойчивости при сжатии легче достигается у длинных и тонких стержней с большими расстояниями между опорами.

Формула Эйлера (6.1) получена при условии возникновения только *упругих деформаций* и применима лишь для стержней, фактическая гибкость λ которых *больше или равна* предельной гибкости $\lambda_{пред}$:

$$\lambda \geq \lambda_{пред}. \quad (6.2)$$

Фактическая гибкость λ определяется размерами стержня, формой его поперечного сечения и способом закрепления:

$$\lambda = \frac{\mu\ell}{i_{min}}, \quad (6.3)$$

где i_{min} – минимальный осевой радиус инерции поперечного сечения стержня;

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}, \quad (6.4)$$

где F – площадь поперечного сечения стержня.

Предельная гибкость $\lambda_{пред}$ зависит только от физико-механических характеристик материала стержня E и $\sigma_{пц}$:

$$\lambda_{пред} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{пц}}}, \quad (6.5)$$

где $\sigma_{пц}$ – предел пропорциональности.

При невыполнении условия (6.2) критическая сила может быть рассчитана по эмпирической формуле *Ф.С. Ясинского*.

Для определения критической силы из опыта $P_{кр}^0$ используется установка, показанная на рисунке 6.2. Стержень 1 сжимается под действием грузов Q при помощи рычага 2. Противовес 3 уравнивает рычаг 2, устраняя тем самым влияние веса рычага на результаты опыта. Опорные устройства 4 позволяют осуществить шарнирное закрепление стержня (болты 5 вывернуты) или жёсткое защемление его концов (болты 5 затянуты).

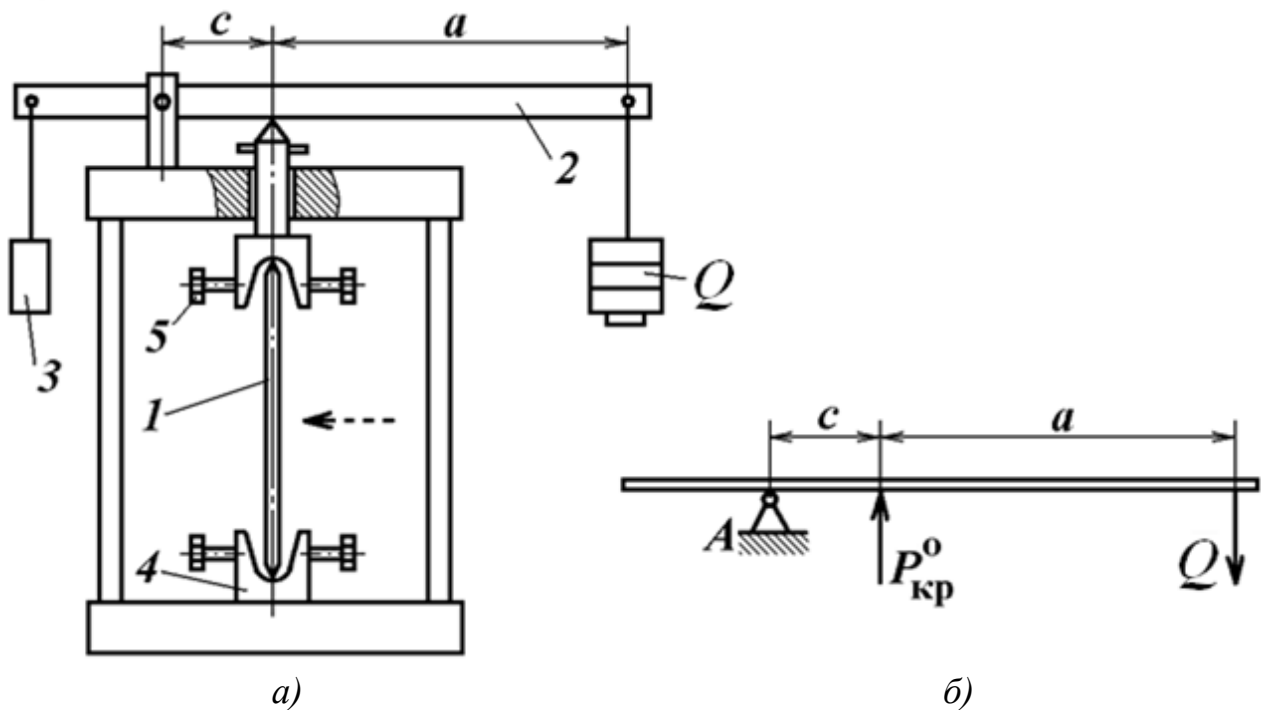


Рисунок 6.2 – Схема лабораторной установки а) и нагрузочного рычага б)

Лабораторная установка позволяет найти величины критической силы для сжимаемого стержня при трёх видах его закрепления (рисунок 6.3):

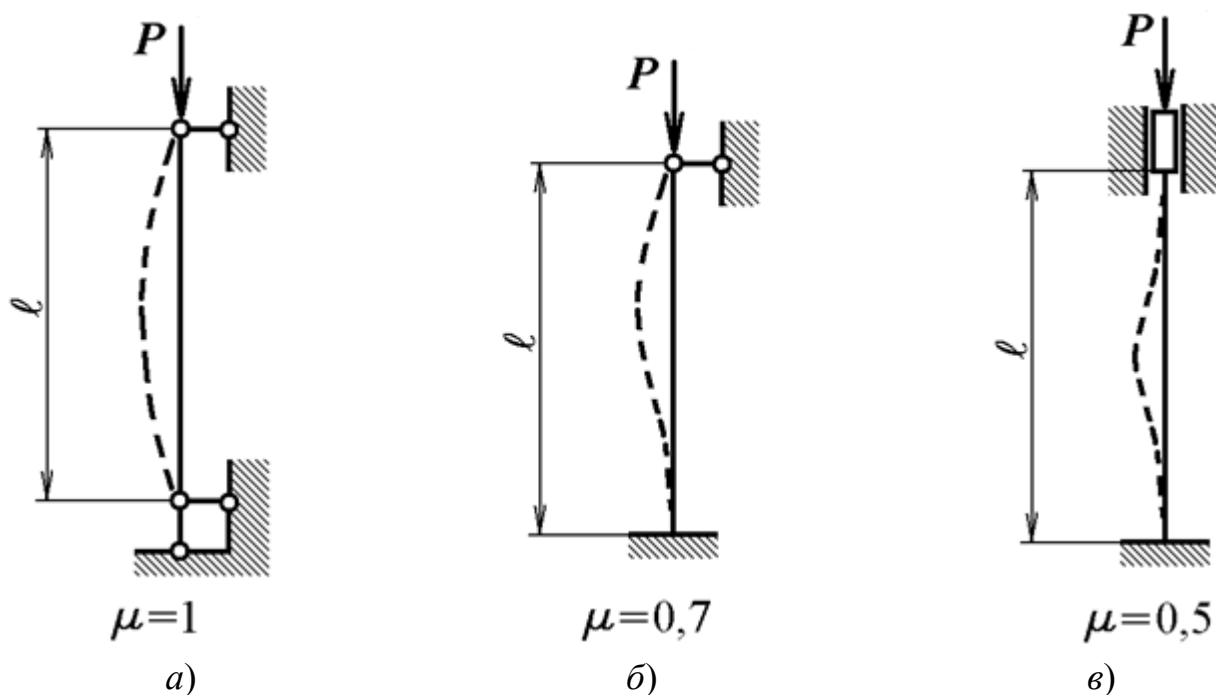
а) стержень шарнирно закреплён с двух сторон ($\mu = 1$);

- б) стержень одним концом закреплён жёстко, а вторым – шарнирно (коэффициент $\mu = 0,7$);
 в) стержень жёстко закреплён с двух сторон ($\mu = 0,5$).

Порядок выполнения работы

1 Замерить геометрические размеры стержней: ширину b , толщину h поперечного сечения и рабочую длину ℓ . Выписать их механические характеристики E , $\sigma_{тц}$.

2 По условию формулы (6.2) проверить применимость формулы Эйлера.



- а) шарнирно с двух сторон ($\mu = 1$),
 б) один жёстко, второй шарнирно ($\mu = 0,7$),
 в) жёстко с двух сторон ($\mu = 0,5$)

Рисунок 6.3 – Способы закрепления концов стержня

3 Если условие формулы (6.2) выполняется, вычислить теоретическое значение критической силы $P_{кр}$ по формуле (6.1) для каждого исследуемого способа закрепления стержня.

4 Для нахождения силы $P_{кр}^o$ из опыта закрепить стержень в опорах установки и произвести его нагружение при помощи разновесов, например, предварительной силой $Q = 5$ Н.

5 Проверить устойчивость стержня. Для этого лёгким нажатием руки по середине стержня (показано пунктирной стрелкой на рисунке 6.2 а) немного изогнуть его и, отпустив, проследить за его возвращением в первоначальное прямолинейное положение.

6 Повторять опыт, увеличивая каждый раз силу Q , до момента невозвращения стержня в первоначальное положение в связи с потерей устойчивости. Найденную величину веса Q , вызывающую критическое деформированное состояние стержня, занести в отчет (таблица 6.1).

7 Опыты по пунктам 4–6 произвести для исследуемых способов закрепления концов стержня.

8 Из условия статического равновесия рычага 2 (рисунок 6.2 б) по известной из опыта силе Q определить величину критической силы $P_{кр}^o$.

9 Сравнить теоретические значения критической силы с экспериментальными результатами.

Отчет о работе

1 Наименование и цель работы.

2 Схемы закрепления стержня (рисунок 6.3) и его нагружения (рисунок 6.2 б).

3 Характеристики материала стержня и его поперечного сечения:

– материал – сталь;

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

– предел пропорциональности $\sigma_{пц} = 200$ МПа;

– предельная гибкость $\lambda_{пред} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{пц}}} = \dots$;

– ширина $b = \dots$ мм;

– толщина $h = \dots$ мм;

– минимальный осевой момент инерции сечения $J_{min} = \frac{bh^3}{12} = \dots$ мм⁴.

4 Результаты испытания (таблица 6.1).

5 Выводы: опытным путём проверили справедливость формулы Эйлера по определению критической сжимающей силы; расхождение результатов – от ... до ... %.

Контрольные вопросы

1 Назовите три основные задачи курса «Сопротивление материалов».

2 Чем характеризуются устойчивое, неустойчивое и критическое деформированные состояния?

3 Что называется продольным изгибом?

4 Какую величину сжимающей силы называют критической?

5 От чего, согласно формуле Эйлера, зависит величина критической сжимающей силы?

6 Укажите условие применимости формулы Эйлера.

Таблица 6.1 – Результаты испытания

Размеры стержня и результаты опыта	Закрепление концов стержня		
	шарнирное ($\mu = 1$)	один – шарнирно, другой – жёстко ($\mu = 0,7$)	жёсткое ($\mu = 0,5$)
Рабочая длина ℓ , мм			
Гибкость стержня λ			
Вес груза Q , Н			
Критическая сила теоретическая, Н $P_{кр} = \frac{\pi^2 E J_{min}}{(\mu \ell)^2}$			
Критическая сила опытная $P_{кр}^o$, Н			
Погрешность, % $\frac{P_{кр} - P_{кр}^o}{P_{кр}} \cdot 100\%$			

7 Как влияет способ закрепления стержня на величину критической силы?

8 Во сколько раз изменится величина критической сжимающей силы, если заменить шарнирные опоры стержня на опоры с жёстким защемлением?

9 От чего зависит фактическая гибкость стержня?

10 Какие характеристики материала необходимо знать для определения предельной гибкости стержня?

11 Приведите примеры элементов деталей машин, подверженных продольному изгибу.

Лабораторная работа № 7

Испытание на удар двухопорной балки

Цель работы: определить динамический коэффициент при изгибающем ударе падающим грузом по однопролетной стальной балке с переменной высоты.

Основные положения

В зависимости от скорости изменения во времени различают статические и динамические нагрузки. Постоянные или медленно изменяющиеся нагрузки относятся к статическим, быстро изменяющиеся – к динамическим. Разновидностью динамических нагрузок является удар.

Под *ударом* понимается взаимодействие движущихся тел при их соприкосновении, характеризуемое резким изменением скоростей точек этих тел за очень короткий промежуток времени (период соударения исчисляется тысячными, а иногда и миллионными долями секунды). Удар сопровождается звуковыми и тепловыми явлениями, колебаниями высокой частоты, большими инерционными нагрузками и т. п.

В сопротивлении материалов применяется приближенный метод расчета на удар. При этом динамическое перемещение (прогиб) δ_d поперечного сечения балки (рисунок 7.1) от падающего груза весом P определяется по линейной зависимости:

$$\delta_d = \delta_c K_d, \quad (7.1)$$

где δ_c – статическое перемещение поперечного сечения балки от безударного (плавного, медленного) приложения груза;

K_d – динамический коэффициент, показывающий во сколько раз динамическое перемещение больше статического ($K_d = \frac{\delta_d}{\delta_c}$).

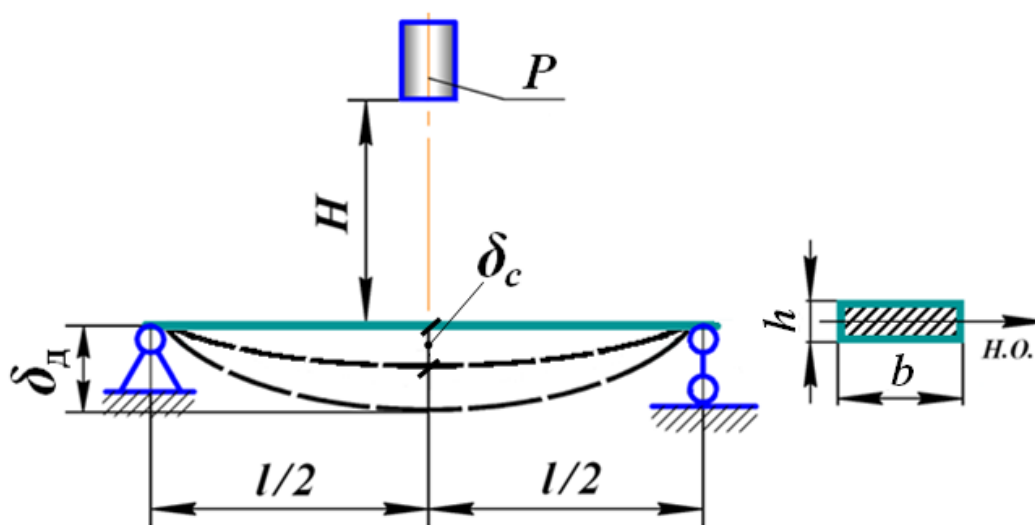


Рисунок 7.1 – Расчетная схема нагружения балки

Статическое перемещение при изгибе может быть найдено, например, по способу А.К. Верещагина. Так, прогиб *среднего* сечения δ_c пролета двухопорной балки от статически приложенной в этом сечении силы, равной весу груза P , вычисляется по формуле:

$$\delta_c = \frac{Pl^3}{48EJ_{H.O.}}, \quad (7.2)$$

где l – длина пролета (расстояние между опорами);

E – модуль продольной упругости материала балки (для стали величина $E = 2 \cdot 10^5$ МПа);

$J_{н.о.}$ – осевой момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси.

Динамический коэффициент K_d в случае свободного падения груза рассчитывается по формуле:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}}, \quad (7.3)$$

где H – высота падения груза.

Резкое приложение нагрузки без высоты падения груза ($H = 0$) называется *мгновенным* или *внезапным*.

В основе выражения 7.3 принято допущение о том, что кинетическая энергия ударяющего груза полностью, без потерь, переходит в потенциальную энергию ударяемой системы. Кроме того, при выводе формулы не учитывалась масса ударяемой конструкции.

Опытное определение перемещений δ_c^o , δ_s^o среднего сечения пролета балки осуществляется на специальной установке (рисунок 7.2). Гибкая *стальная* балка 1 прямоугольного поперечного сечения шарнирно закреплена на опорах 2 и 3. Одна из опор выполнена в виде качающейся стойки, эквивалентной шарнирно-подвижной опоре. В середине пролета балки закреплен конус 4, на который падает груз 5. Груз, заклиниваясь на конусе, совершает вместе с балкой колебания после удара. Высота падения груза H отсчитывается по линейке 6. Величина прогибов сечения балки δ_c^o , δ_s^o отмечается подпружиненным карандашом 7 на миллиметровой бумаге.

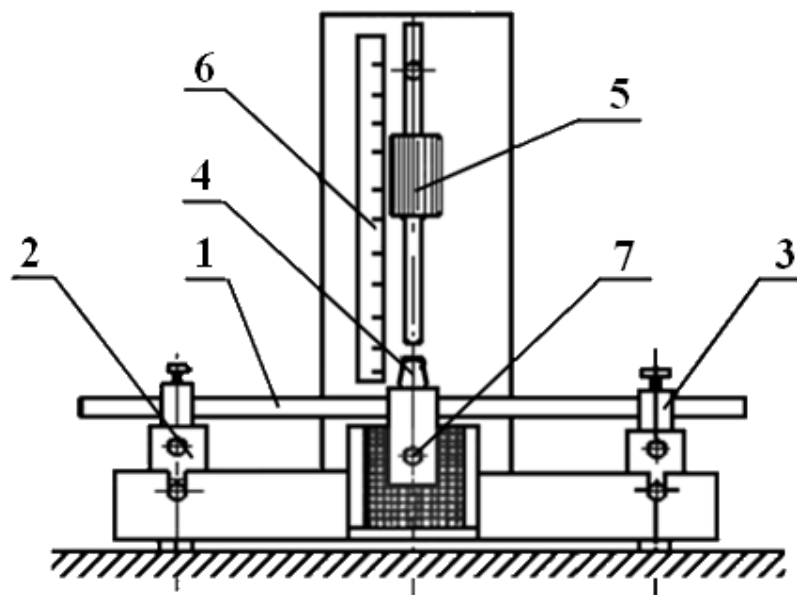


Рисунок 7.2 – Установка для определения перемещения

Порядок выполнения работы

1 Определить пролет l , толщину h и ширину b прямоугольного поперечного сечения балки, вес груза P .

2 Вычислить величину осевого момента инерции поперечного сечения: $J_{н.о.} = bh^3/12$.

3 Рассчитать теоретический статический прогиб δ_c среднего сечения балки (формула 7.2), приняв модуль продольной упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

4 Определить опытное значение статического прогиба δ_c^o . Для этого груз приложить к балке статически, т. е. плавно, медленно и с помощью миллиметровой бумаги снять показания δ_c^o .

5 Поднять груз на необходимую высоту H , отметить на миллиметровой бумаге первоначальное положение подпружиненного карандаша 7 (рисунок 7.2). Груз отпустить. Замерить опытный динамический прогиб δ_o^o , т. е. расстояние от первоначальной отметки карандаша до конечной.

6 Вычислить опытное значение динамического коэффициента K_o^o :

$$K_o^o = \delta_o^o / \delta_c^o. \quad (7.4)$$

7 Опыт повторить 3-4 раза, изменяя высоту падения груза H (высота отсчитывается от поверхности балки до нижнего края груза).

8 Определить теоретический динамический коэффициент K_o для каждой высоты падения груза по выражению 7.3.

9 В одной системе координат построить графики зависимости динамических коэффициентов K_o^o и K_o от высоты падения груза H .

10 Сопоставить теоретические и опытные значения динамического коэффициента.

Отчет о работе

1 Наименование и цель работы.

2 Расчетная схема балки.

3 Размеры балки, мм:

– длина пролета $l =$;

– толщина поперечного сечения $h =$;

– ширина сечения $b =$.

4 Вес падающего груза P , Н:

$$P =$$

5 Осевой момент инерции поперечного сечения $J_{н.о.}$, мм⁴:

$$J_{н.о.} =$$

6 Модуль продольной упругости материала балки E , МПа:

$$E =$$

7 Теоретический статический прогиб среднего сечения балки δ_c , мм:

$$\delta_c =$$

8 Найденный из опыта статический прогиб сечения δ_c^o , мм:

$$\delta_c^o =$$

9 Опытные величины прогиба δ_o^o и динамического коэффициента K_o^o при ударе балки падающим грузом P с высоты H (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Опытные и теоретические результаты

№ п/п	Высота падения груза H , мм	Прогиб δ_o^o , мм	Динамический коэффициент		
			опытный $K_o^o = \frac{\delta_o^o}{\delta_c^o}$	теоретический K_o	процент расхождения δ , %

10 Теоретические значения динамического коэффициента K_o (формула 7.3) в зависимости от высоты падения груза H . Величины K_o занести в таблицу 7.1.

11 Сравнить теоретические и опытные результаты для каждой высоты падения (таблица 7.1):

$$\delta = \frac{K_o - K_o^o}{K_o} \cdot 100\% =$$

12 Графики зависимости динамических коэффициентов K_o и K_o^o от высоты падения груза H .

13 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие нагрузки принято считать статическими, какие динамическими?
- 2 Что понимается под ударом?
- 3 Что называется динамическим коэффициентом при ударе?
- 4 Запишите формулу для вычисления динамического коэффициента. Объясните влияние на него величины статического прогиба.
- 5 Какие основные допущения используются при выводе формулы динамического коэффициента?
- 6 Приведите формулу для расчета теоретической величины статического прогиба балки в данной работе.

7 Как при испытании определяется опытный статический прогиб? А динамический?

8 Почему опытное значение динамического коэффициента меньше, чем теоретическое? Объясните возрастание этого расхождения при увеличении высоты падения груза.

Единицы измерения силы, напряжения и длины

- 1 ньютон (Н); 1 килоньютон (кН); 1 меганьютон (МН);
- 1 тонна-сила (тс); 1 килограмм-сила (кгс);
- 1 паскаль (Па); 1 мегапаскаль (МПа); 1 гигапаскаль (ГПа).
- 1 тс = 10^3 кгс;
- 1 кгс ≈ 10 Н;
- 1 МН = 10^3 кН = 10^6 Н;
- 1 Па = 1 Н/м²;
- 1 МПа = 10^6 Па ≈ 10 кгс/см² $\approx 0,1$ кгс/мм² = 1 Н/мм²;
- 1 МПа = 1 Н/мм²;
- 1 ГПа = 10^9 Па;
- 1 метр (м); 1 миллиметр (мм); 1 микрометр (мкм);
- 1 м = 10^3 мм = 10^6 мкм.

Список литературы

1 Букеткин Б. В., Горбатовский А. А., Кисенко И. Д., Экспериментальная механика : учебник / под ред. Р. К. Вафина, О. С. Нарайкина. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 136 с.

2 Вольмир А. С., Григорьев Ю. П., Марьин В. А., Станкевич А. И., Сопротивление материалов. Лабораторный практикум : учебное пособие для вузов. – Москва : Дрофа, 2006. – 352 с.

3 Пояркова Е. В., Подоляк Н. Я., Диньмухаметова Л. С., Гаврилов А. А., Механика материалов. Лабораторный практикум : учебное пособие. – Оренбург : ОГУ, 2017. – Доступ из ЭБС «Консультант студента».

4 Николаенко В. Л., Механика : учебное пособие. – Москва : ИНФРА-М; Минск : Новое знание, 2011. – 636 с. – Доступ из ЭБС «Znanium.com».

5 Атапин В. Г., Механика. Сопротивление материалов : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Доступ из ЭБС «Консультант студента».

Коротовских Валентин Константинович
Тютрин Сергей Геннадьевич

МЕХАНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов очной формы обучения
направления 20.03.01

Редактор Н. Н. Погребняк

Подписано в печать 24.04.19	Формат 60×84 1/16	Бумага 65 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 3,0	Уч.- изд. л. 3,0
Заказ 79	Тираж 25	Не для продажи

БИЦ Курганского государственного университета.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.