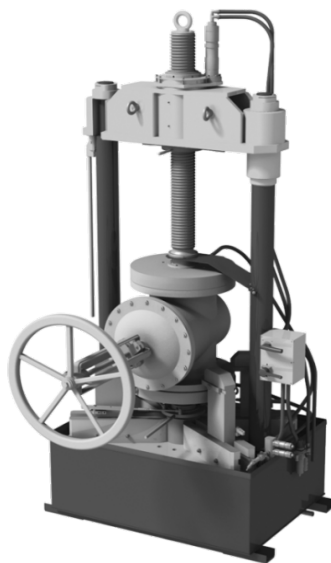


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра механики машин и основ конструирования

**ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИСПЫТАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ**

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для магистрантов направления 15.04.01



Курган 2017

Кафедра: «Механика машин и основы конструирования».

Дисциплина: «Прочностные расчеты и методы исследований и испытаний при проектировании и производстве трубопроводной арматуры»

Направление: 15.04.01 «Машиностроение» (направленность «Компьютерный инжиниринг и автоматизация производства в арматуростроении»).

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

Составлены на основе:

Бубнов В. А., Емельянова Н. С., Коротовских В. К. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. – Курган : Изд-во КГУ, 2000. Ч. 1. – 41 с.;

Бубнов В. А., Емельянова Н. С., Коротовских В. К., Костенко С. Г., Тютрин С. Г. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. – Курган : Изд-во КГУ, 2000. Ч. 2. – 42 с.;

Коротовских В. К., Костенко С. Г., Тютрин С. Г. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. – Курган : Изд-во КГУ, 2001. Ч. 3. – 43 с.

Утверждены на заседании кафедры 27 декабря 2016 г.

Рекомендованы методическим советом университета 12 декабря 2016 г.

Предисловие

Согласно ГОСТ Р 53672-2009 в основу расчетного обоснования прочности арматуры должны быть положены оценки по следующим предельным состояниям: разрушение детали, пластическая деформация по всему сечению детали, недопустимое изменение размеров элементов по условиям функционирования арматуры, потеря устойчивости детали и некоторые другие. При проведении расчетов арматуры на прочность следует, среди основных, учитывать сейсмические, ударные и вибрационные нагрузки, а также динамические воздействия движущихся деталей.

Необходимые для расчетов характеристики материалов, формулы, поправочные коэффициенты приведены в соответствующих нормативных документах. Они были установлены по результатам испытаний или прошли экспериментальную проверку. Изучению применяемых методов исследований и испытаний посвящен данный цикл лабораторных работ.

При осуществлении расчетов в процессе выполнения работ необходимо учитывать единицы измерения нагрузки, напряжения и длины.

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).
- $1 \text{ тс} = 10^3 \text{ кгс}$;
- $1 \text{ кгс} \approx 10 \text{ Н}$;
- $1 \text{ МН} = 10^3 \text{ кН} = 10^6 \text{ Н}$;
- $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$;
- $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} \approx 10 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ кгс/мм}^2 = 1 \text{ Н/мм}^2$;
- $1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$;
- $1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}$;
- 1 метр (м); 1 миллиметр (мм); 1 микрометр (мкм);
- $1 \text{ м} = 10^3 \text{ мм} = 10^6 \text{ мкм}$.

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 трубопроводной арматуры (ГОСТ Р 55509-2013 «Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Основные требования к выбору материалов»). Наибольшую информацию о механических свойствах металлов можно получить из статических испытаний образцов на растяжение. Испытания для условий нормальной температуры ($10...35^{\circ}\text{C}$) 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 $l_0 = 10d_0$.

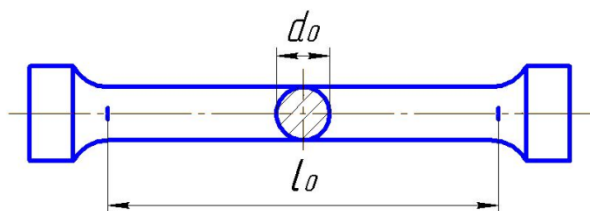


Рисунок 1.1 – Образец для испытания на растяжение

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.

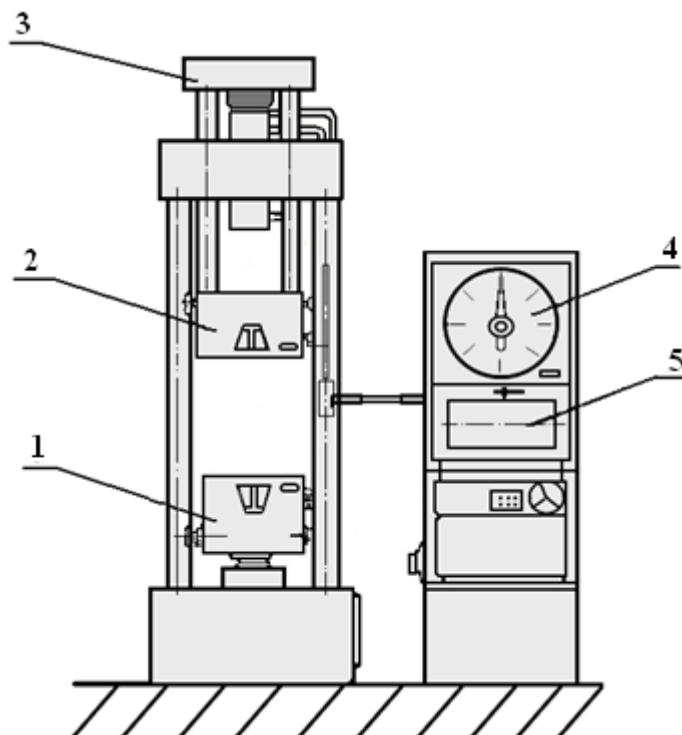


Рисунок 1.2 – Схема разрывной машины модели Р-10

Основными узлами машины модели Р-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.

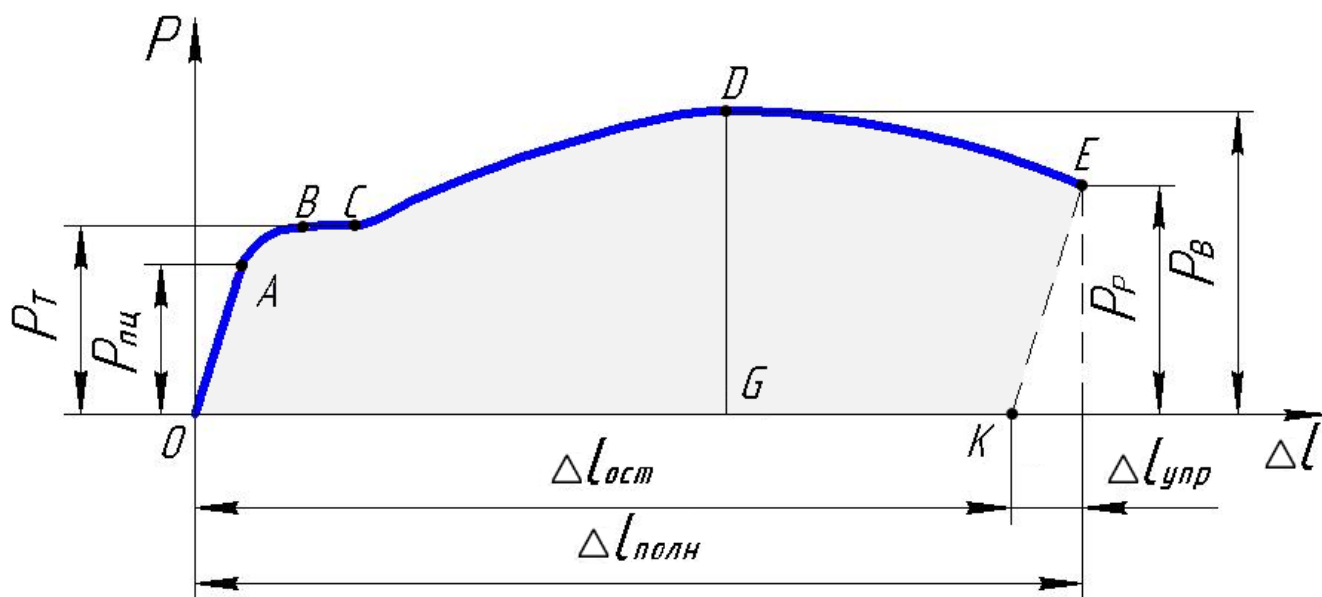


Рисунок 1.3 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

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_R . 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 больших пластических деформаций. Количественно это свойство определяется следующими напряжениями:

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

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

где $P_{пц}$ – 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 $\sigma_{пц}$ и σ_y незначительно отличаются друг от друга ($\sigma_{пц} \approx \sigma_y$). Поэтому обычно определяется только одно напряжение $\sigma_{пц}$.

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

2 Важнейшей механической характеристикой пластичных металлов и сплавов является *предел текучести (физический и условный)*. 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).

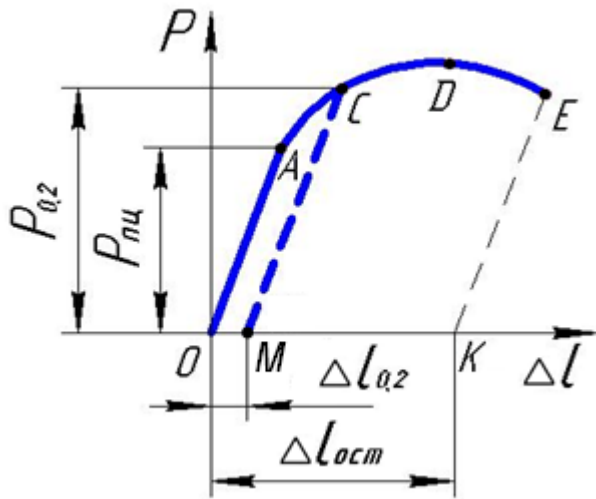


Рисунок 1.4 – Определение силы $P_{0,2}$, соответствующей условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$

М 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) σ_B* – наибольшее условное напряжение, которое способен выдержать материал без разрушения:

$$\sigma_B = P_B / F_0, \quad (1.4)$$

где P_B – максимальная сила, предшествующая разрыву образца (точка D).

Напряжение σ_B 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) σ_p* – напряжение в момент разрыва образца:

$$\sigma_p = P_p / F_k, \quad (1.5)$$

где P_p – величина силы, соответствующей разрушению (точка E); F_k – конечная наименьшая площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (измеренная после извлечения образца из захватов машины).

Предел текучести σ_T и временное сопротивление σ_B 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 σ_B , так как это приведет к их разрушению. Более того, для пластичных материалов величина рабочих напряжений должна

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

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

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

быть меньше предела текучести σ_T . 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.

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 , %:

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

где $\Delta l_{ост} = l_K - l_0$ – абсолютная остаточная деформация (изменение начальной длины l_0 расчетной части); l_K – 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 , %:

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

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

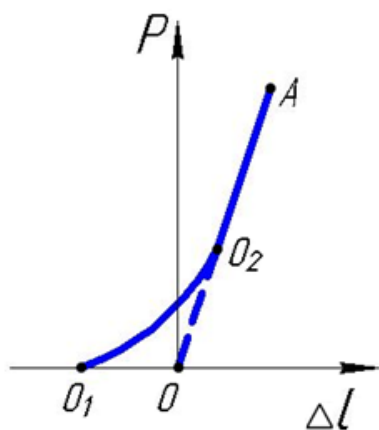


Рисунок 1.5 – Выбор начала координат диаграммы растяжения

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 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 Замерить (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 (рисунок 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 $P_{пц}$, 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

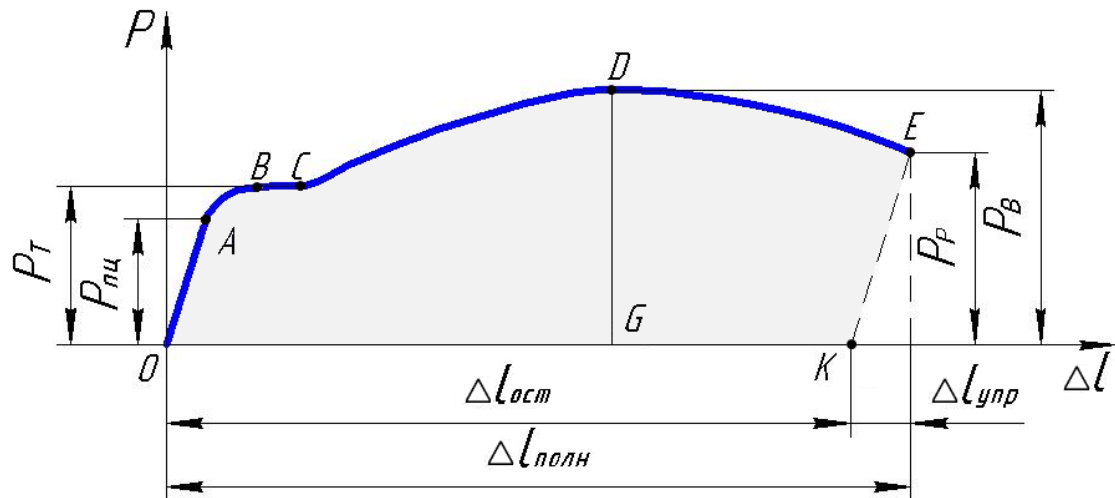
- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Модель испытательной машины.
- 3 Эскиз образца до и после испытания.
- 4 Размеры образца до и после разрушения (таблица 1.2).

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:



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 $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0} =$	Относительное остаточное удлинение $\delta = \frac{l_{\text{к}} - l_0}{l_0} \cdot 100\% =$
Предел текучести $\sigma_{\text{Т}} = \frac{P_{\text{Т}}}{F_0} =$	
Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_{\text{В}} = \frac{P_{\text{В}}}{F_0} =$	Относительное остаточное сужение поперечного сечения $\psi = \frac{F_0 - F_{\text{к}}}{F_0} \cdot 100\% =$
Истинное напряжение при разрыве $\sigma_{\text{Р}} = \frac{P}{F_{\text{к}}} =$	

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

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 воском, парафином, графитовой или другими смазками; с помощью полимерных прокладок. Применяются также образцы с конусообразной торцевой поверхностью и с кольцевой расточкой на торцах, заполненной густой смазкой.

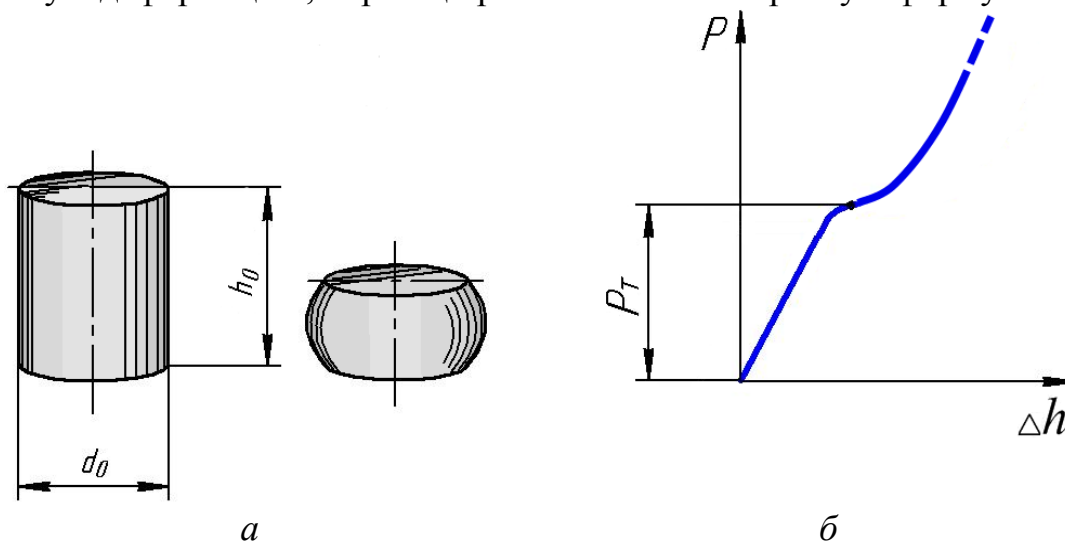
Испытания на сжатие проводятся на универсальных машинах или специальных прессах необходимой грузоподъемности. В данной лабораторной работе используется универсальная машина грузоподъемностью 100 кН (10 тс) модели *P-10* с записью зависимости укорочения образца от нагрузки $\Delta h = f(P)$. На этой же 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 $\sigma_{\text{пц}}$ 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 2.1 *а* показан вид образца до и после испытания, а на рисунке 2.1 *б* приведена диаграмма сжатия пластичной стали.

На диаграмме сначала наблюдается прямая линия, выражающая закон Гука. Затем при силе $P_{\text{т}}$ (рисунок 2.1 *б*) отмечается *небольшой* участок текучести и дальнейшее возрастание остаточной деформации Δh по определенной зависимости от нагрузки. Уменьшаясь по высоте, образец увеличивается (и 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.



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

Рисунок 2.1 – Образец и диаграмма сжатия пластичной стали

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

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 $\sigma_{0,2P} = 0,88 \sigma_{0,2C}$.

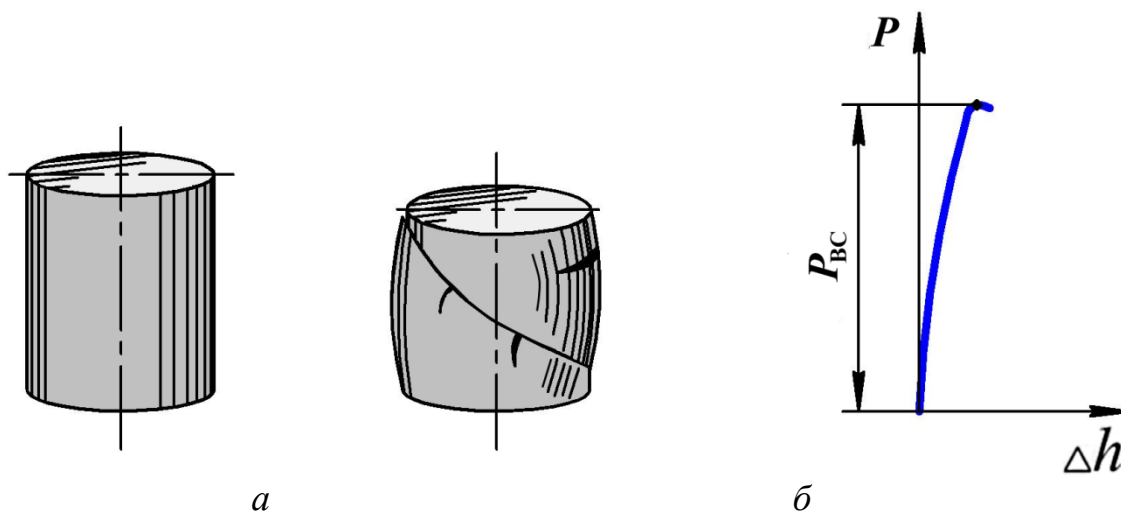
Образец при больших нагрузках (на специальном оборудовании) может быть сплюснен в тонкий диск без разрушения. Поэтому фактический предел прочности σ_{BC} , как напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей *разрушению*, для пластичных материалов при сжатии установить *не удастся*. В связи с этим определяют *условный* предел прочности $\sigma_{BCул}$, 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 $P_{BCул}$.

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 2.2 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 2.2 б показана диаграмма сжатия чугуна в виде линии малой кривизны без признаков текучести (в практических расчетах считают, что чугун подчиняется закону Гука).

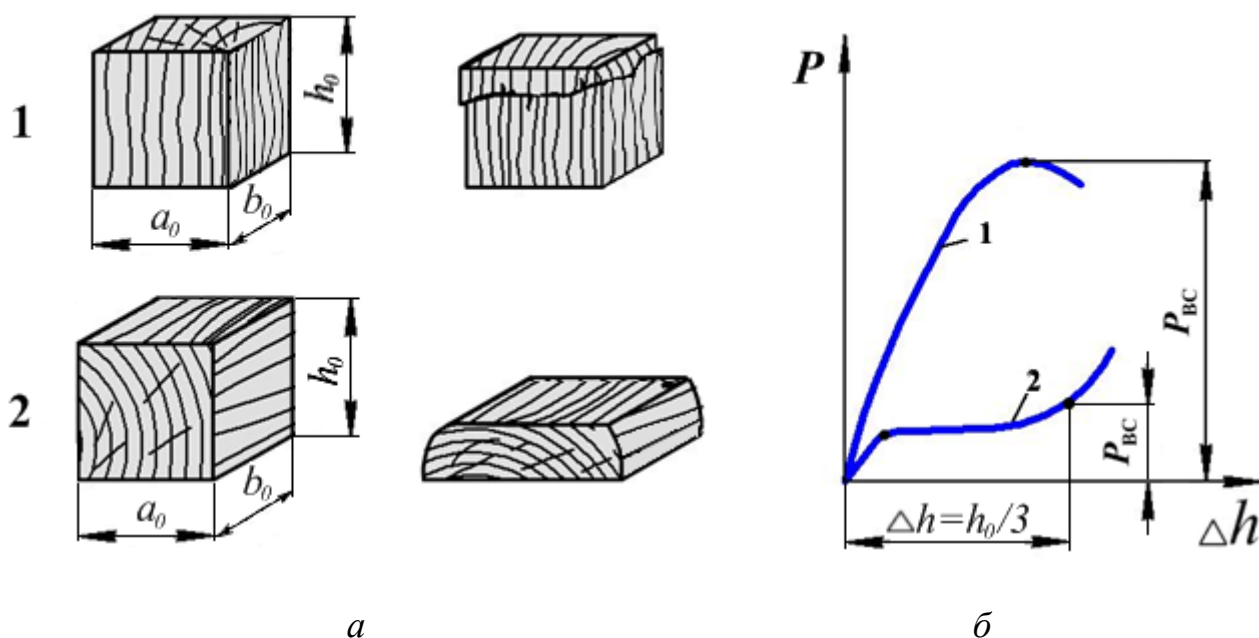


а) общий вид образца до и после испытания; б) диаграмма сжатия чугуна
Рисунок 2.2 – Образец и диаграмма сжатия чугуна

По максимальной силе P_{BC} определяется основная механическая характеристика прочностных 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 2.3 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 $45^\circ - 60^\circ$ (рисунок 2.3 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 2.3 б; кривая 1) дерева *вдоль* волокон соответствуют сжатию *хрупких* материалов (сравните с диаграммой сжатия чугуна).



1 – дерево *вдоль* волокон; 2 – дерево *поперек* волокон
 Рисунок 2.3 – 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 2.3 б; кривая 2). При отсутствии пороков (сучков, трещин) в древесине образец интенсивно уплотняется (спрессовывается) без видимых признаков разрушения за счет течения друг по другу кольцевых слоев дерева (рисунок 2.3 а - 2). Момент начала разрушения полностью спрессованного образца установить очень сложно. Поэтому условно за разрушающую нагрузку принимают такое значение силы P_{BC} , 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 деревянных - отметить грани, которыми они будут ориентироваться на плите испытательной машины: *вдоль* волокон, *поперек* волокон.

Измерить начальные размеры образцов. Измерение производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,1 мм. За оконча-

тельный результат принимается среднее арифметическое двух измерений. Вычислить площади поперечных сечений F_0 с округлением до $0,1 \text{ мм}^2$.

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 $P_{BC \text{ усл}}$.

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 $\sigma_{0,2}$):

$$\sigma_T = P_T / F_0 \text{ или } (\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0) \quad (2.1)$$

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

$$\sigma_{BC \text{ усл}} = P_{BC \text{ усл}} / F_0, \quad (2.2)$$

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} :

$$\sigma_{BC} = P_{BC} / F_0. \quad (2.3)$$

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 (2.3).

Отчет о работе

1 Название и цель работы.

2 Модель испытательной машины.

3 Размеры образцов и результаты испытаний (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – 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 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 2.1.

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?

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 № 3

Экспериментальное исследование напряженного состояния тонкостенной трубы при кручении

Цель работы: определение опытным путем величин главных напряжений и сопоставление их с максимальными касательными напряжениями, полученными при теоретическом расчете.

Основные положения

Кручением называется такой вид нагружения, при котором в поперечных сечениях стержня действует только один внутренний силовой фактор – крутящий момент. Остальные внутренние силовые факторы равны нулю.

Для определения вида напряженного состояния материала в окрестности исследуемой точки детали мысленно вырезают элементарные параллелепипеды (рисунок 3.1 а). Из теории известно, что при кручении стержня круглого или кольцевого поперечного сечения его материал испытывает *чистый сдвиг*. Чистый сдвиг – это разновидность плоского напряженного состояния, при кото-

ром на гранях элементарного параллелепипеда возникают только касательные напряжения τ . При этом величина этих касательных напряжений является наибольшей из всей совокупности касательных напряжений в рассматриваемой точке: $\tau = \tau_{max}$ (рисунок 3.1 б).

При чистом сдвиге главные напряжения σ_1 и σ_3 равны максимальным касательным напряжениям (рисунок 3.1 б):

$$\sigma_1 = +\tau_{max}, \quad \sigma_3 = -\tau_{max}. \quad (3.1)$$

Второе главное напряжение $\sigma_2 = 0$, т.к. напряженное состояние – плоское.

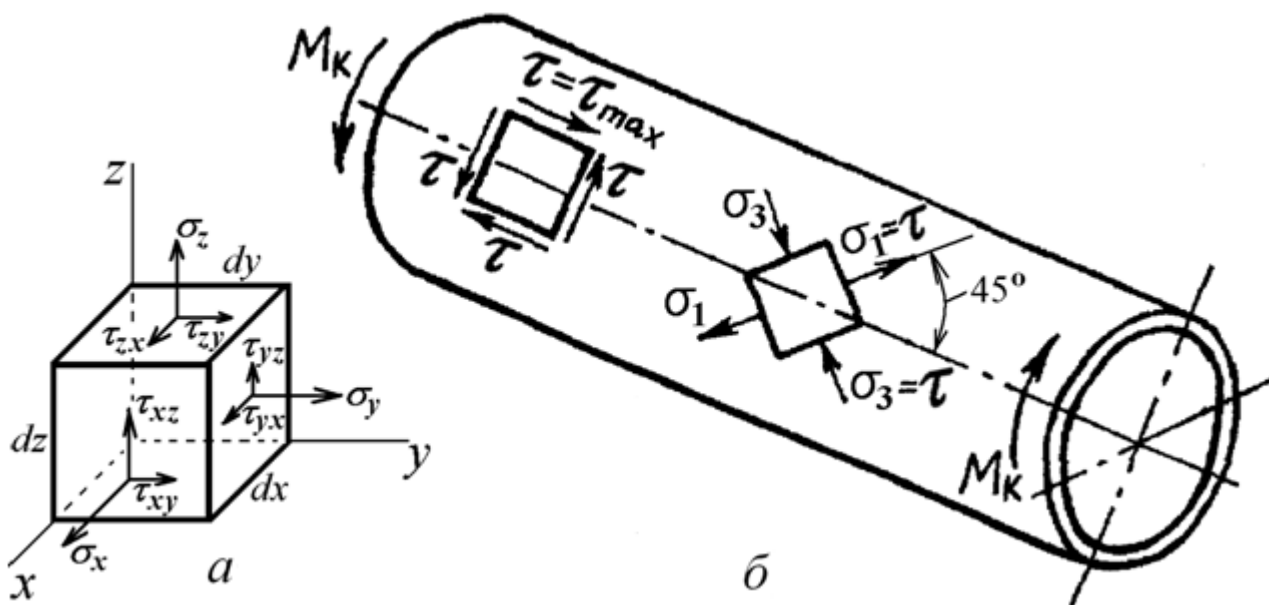


Рисунок 3.1 – Напряжения на гранях элементарного параллелепипеда в общем случае (а) и при чистом сдвиге (б)

Площадки, на которых возникают только нормальные напряжения, а касательные равны нулю, называются *главными площадками*. Нормальные напряжения, действующие на главных площадках, носят название *главных напряжений* $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

При чистом сдвиге главные площадки составляют с площадками чистого сдвига угол 45° . Главные напряжения σ_1 и σ_3 экспериментально определяются по величине главных деформаций ϵ_1 и ϵ_3 . Направления главных деформаций совпадают с направлениями главных напряжений. Величины деформаций и напряжений измеряют с помощью тензорезисторов.

Тензорезистор – это проволочный или фольговый датчик электрического сопротивления. Тензорезистор наклеивают на контролируемую поверхность детали по направлению деформации растяжения или сжатия. При растяжении детали растягивается и датчик, что приводит к увеличению его электрического сопротивления. При сжатии тензорезистор укорачивается и, соответственно, уменьшается его электрическое сопротивление. При этом изменение электри-

ческого сопротивления тензодатчика прямо пропорционально измеряемым деформации ε или напряжению σ :

$$\varepsilon = \Delta A \cdot k \quad (3.2)$$

$$\text{или } \sigma = \Delta A \cdot k, \quad (3.3)$$

где ΔA – приращение показаний регистрирующего прибора;

k – коэффициент чувствительности регистрирующего прибора.

Для измерителя деформаций ИДЦ-1 этот коэффициент равен $k = 10^{-5}$, для весоизмерителя *WeiHeng* этот коэффициент равен $k = 7,835$ МПа.

Однако на деформации сдвига или среза тензорезистор *не реагирует* (т.к. такие деформации не изменяют его длины). Поэтому для того, чтобы определить максимальные касательные напряжения при чистом сдвиге τ_{max} нужно измерить главные напряжения и воспользоваться равенством (3.1).

На рисунке 3.2 представлена схема установки для проведения испытания. Образец 3 (в виде тонкостенной трубы) консольно закреплен в станине 5. Нагружение образца производят при помощи двух равных по весу грузов P , создающих скручивающий момент. Один из грузов подвешен на нити, перекинутой через шкив 4. Рабочие тензорезисторы 1 и 2 наклеены *под углом 45°* к продольной оси трубы (по направлению главных напряжений).

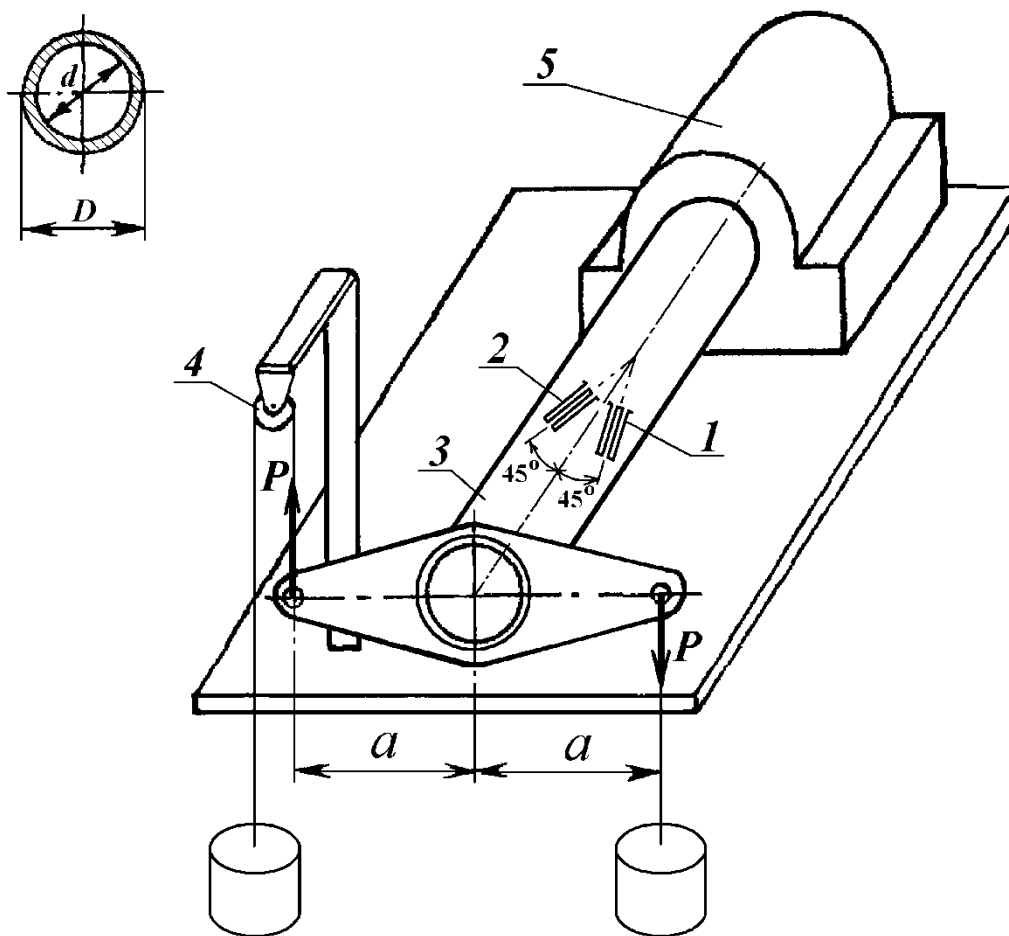


Рисунок 3.2 – Лабораторная установка

После определения по формуле (3.2) главных деформаций ε_1 и ε_3 , находят главные напряжения:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad \sigma_3 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_3, \quad (3.4)$$

где E – модуль продольной упругости; μ – коэффициент поперечной деформации материала трубы. Для стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,27$, соответственно.

Максимальные касательные напряжения определяют теоретическим путём по формуле:

$$\tau_{\max(\text{теор.})} = \frac{\Delta M_k}{W_p}, \quad (3.5)$$

где ΔM_k – крутящий момент, соответствующий ступени нагружения ΔP . Средний момент $\Delta M_k = \Delta P \cdot 2a$ (рисунок 3.2);

W_p – полярный момент сопротивления поперечного сечения трубы.

Полярный момент сопротивления поперечного сечения трубы:

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} (1 - c^4), \quad c = \frac{d}{D}, \quad (3.6)$$

где D – наружный диаметр трубы; d – внутренний диаметр трубы.

Для оценки полученных результатов рассчитывается процент расхождения между напряжениями, определёнными теоретическим и опытным путем:

$$\delta = \frac{\tau_{\max(\text{теор.})} - \tau_{\max(\text{опыт.})}}{\tau_{\max(\text{опыт.})}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где $\tau_{\max(\text{опыт.})} = |\sigma_1|$ или $\tau_{\max(\text{опыт.})} = |\sigma_3|$ (формула 3.4 или 3.3).

Порядок выполнения работы

1 Замерить наружный и внутренний диаметры трубы.

2 По формуле (3.6) вычислить полярный момент сопротивления поперечного сечения трубы.

3 Определить величину наибольшего крутящего момента $M_{k \max}$, до которого деформации подчиняются закону Гука:

$$M_{k \max} \leq \tau_{\text{нц}} \cdot W_p, \quad (3.8)$$

где $\tau_{ни}$ – предел пропорциональности при сдвиге (принять для материала трубы $\tau_{ни} = 100$ МПа).

4 Нагрузить образец предварительной нагрузкой и снять показания с обоих тензорезисторов.

5 Нагрузить трубу равными ступенями крутящего момента ΔM_k и записать показания датчиков. При этом крутящий момент не должен превышать величины M_{kmax} .

6 По результатам опыта найти среднее приращение показаний прибора на ступень нагружения и вычислить главные напряжения σ_1 и σ_3 по выражению (3.4) или (3.3) равные $\tau_{max(опыт.)}$.

7 По формуле (3.5) определить величину максимального касательного напряжения $\tau_{max(теор.)}$ от ступени нагружения.

8 Сравнить величину теоретического значения напряжения с результатами опыта, подсчитав погрешность.

Отчет о работе

1 Название и цель работы.

2 Схема напряженного состояния трубы (рисунок 3.1 б). Зарисовать испытываемую трубу и схему расположения на ней тензорезисторов.

3 Название и тип измерительного прибора, его коэффициент чувствительности k .

4 Размеры тонкостенной трубы и геометрические характеристики её поперечного сечения:

наружный диаметр $D =$;

внутренний диаметр $d =$;

длина плеча рычага $a =$;

полярный момент сопротивления сечения $W_p =$.

5 Величина максимального крутящего момента $M_{kmax} =$.

6 Результаты опыта (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Результаты опыта

№	Нагрузка, H		Показания тензорезисторов			
	P	ΔP	A_1	ΔA_1	A_2	ΔA_2
1						
2						
3						
4						
5						
Средние значения			$\Delta A_{1cp} =$		$\Delta A_{2cp} =$	

Крутящий момент ΔM_k , соответствующий ступени нагружения $\Delta M_k =$; $\Delta P \cdot 2a =$

7 Используя результаты опыта и формулы (3.2), (3.4) или (3.3), определить величины главных напряжений σ_1 и σ_3 .

8 По формуле (3.5) рассчитать максимальное значение касательных напряжений.

9 По формуле (3.7) оценить величины расхождений между теоретическими и опытными значениями напряжений.

10 Выводы: опытным путем определили величины главных напряжений; наибольшая погрешность эксперимента составила ...%.

Контрольные вопросы

1 Какой вид нагружения называется кручением?

2 Для определения вида напряженного состояния материала в окрестности исследуемой точки детали мысленно вырезают ... (что?).

3 Какой вид напряженного состояния испытывает тонкостенная труба при кручении?

4 Какие напряжения называются главными?

5 Какие площадки называются главными?

6 Какой вид имеет расчетная формула для определения максимальных касательных напряжений?

7 Как размещены тензодатчики на трубе и почему выбрано такое расположение?

8 Как определяются величины главных напряжений по известным главным деформациям при чистом сдвиге?

9 На чём основан принцип действия тензорезистора?

Лабораторная работа № 4

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 продольные 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:

$$\sigma = \frac{M}{J_{н.о.}} \cdot Y, \quad (4.1)$$

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

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

$$\sigma_{max} = \frac{M}{J_{н.о.}} \cdot Y_{max} = \frac{M}{W_{н.о.}}, \quad (4.2)$$

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

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

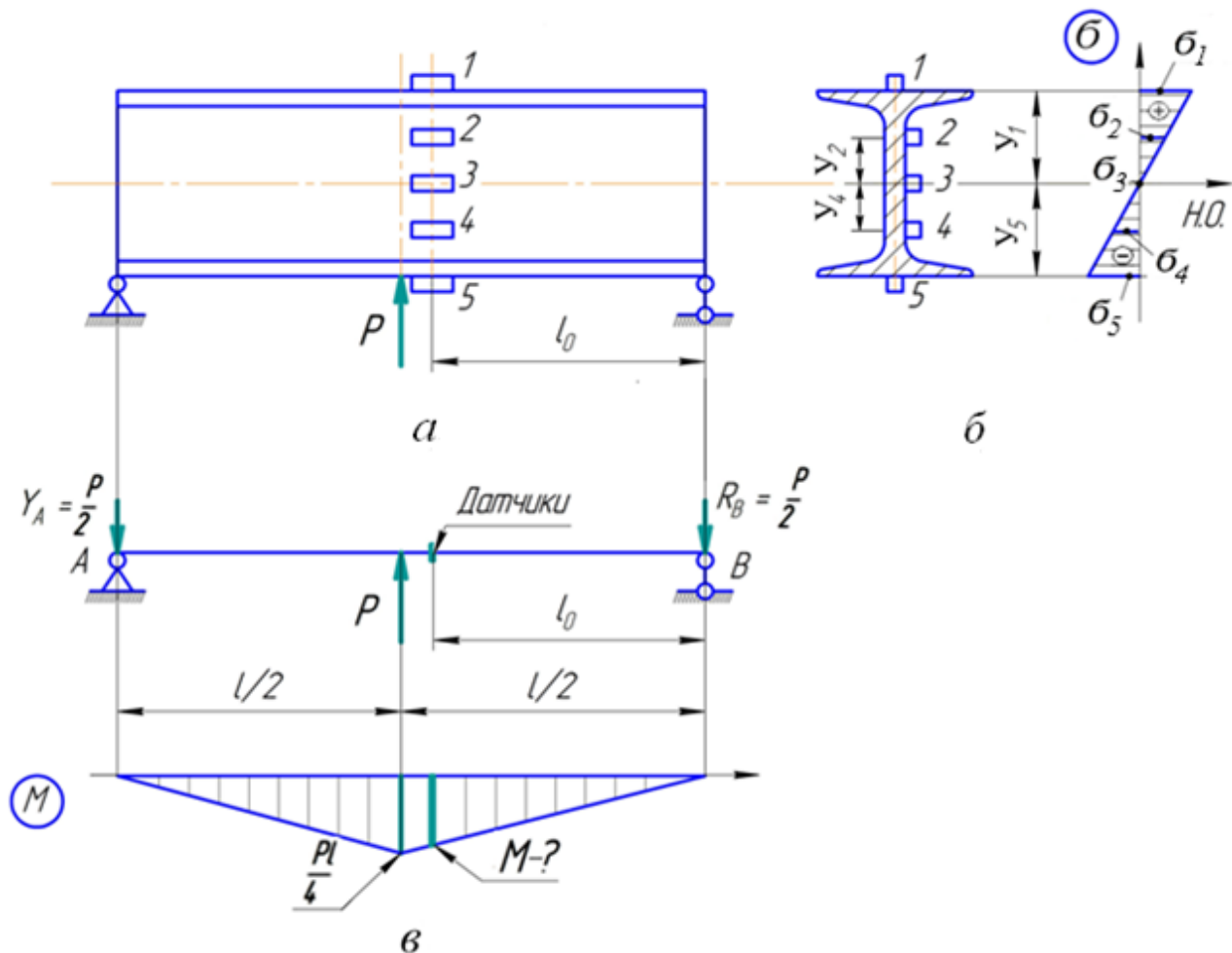
$$\sigma^o = E\varepsilon, \quad (4.3)$$

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 двутаврового (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 4.1 а, б.



а) схема расположения датчиков,
 б) эпюра изменения нормальных напряжений по высоте сечения,
 в) расчетная схема балки и эпюра изгибающего момента
 Рисунок 4.1 – 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:

$$\sigma^0 = E\varepsilon = E\Delta A_{ср}t \quad (4.4)$$

или

$$\sigma^0 = \Delta A_{cp} m, \quad (4.5)$$

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 *WeiHeng* 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 $J_{H.O.} = J_x$ и $W_{H.O.} = W_x$ (ГОСТ 8239-89);
- расстояния от нейтральной оси до датчиков Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 (рисунок 4.1 б).

2 Установить область применения формул (4.1) и (4.2), ограничивая возникающие напряжения, пределом пропорциональности $\sigma_{ну}$:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{H.O.}} \leq \sigma_{ну} \quad (4.6)$$

для предлагаемой схемы $M_{max} = Pl / 4$ (рисунок 4.1 в). Тогда величина допускаемой силы $[P]$, до которой выполняется закон Гука, будет равна:

$$[P] = \frac{4\sigma_{ну}W_{H.O.}}{l}. \quad (4.7)$$

Принять для материала балки предел пропорциональности $\sigma_{ну} = 200$ 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 4.4 (или 4.5) вычислить опытные значения напряжений σ^0 (МПа) в пяти контролируемых точках сечения.

6 Для расчетной схемы балки (рисунок 4.1 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 (4.1) 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 (4.1):

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

4 Результаты опыта (таблица 4.1):

Таблица 4.1 – 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 4.4 или 4.5):

$$\begin{aligned}\sigma_1^o &= && ; \\ \sigma_2^o &= && ; \\ \sigma_3^o &= && ; \\ \sigma_4^o &= && ; \\ \sigma_5^o &= && .\end{aligned}$$

6 Схема нагружения и расчетная схема балки с эпюрой изгибающего момента (рисунок 4.1 а, в).

7 Величина изгибающего момента M (рисунок 4.1 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 (4.1)). Учтите, что $1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= && ; \\ \sigma_2 &= && ; \\ \sigma_3 &= && ; \\ \sigma_4 &= && ; \\ \sigma_5 &= && .\end{aligned}$$

9 Эпюры изменения опытных σ^o (пунктирная линия) и теоретических σ (сплошная линия) напряжений по высоте сечения балки (рисунок 4.1 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 (4.1) 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 № 5

Определение ударной вязкости материала

Цель работы: определить ударную вязкость материала при испытании стандартных образцов на маятниковом копре.

Основные сведения

Механические свойства материала зависят от скорости приложения нагрузки. Характеристики прочности и пластичности, полученные при ее статическом воздействии, могут служить лишь косвенной оценкой ударостойкости материала. Так, например, многие металлы, пластичные при статических нагрузках, при ударе ведут себя как хрупкие.

Чтобы оценить способность сопротивляться удару и выявить склонность к хрупкому разрушению различных материалов, их подвергают динамической (кратковременной, с большой скоростью) нагрузке на испытательных машинах, называемых *маятниковыми копрами*. Наиболее часто такие испытания проводятся на ударный изгиб призматического образца с надрезом - концентратором напряжений посередине согласно ГОСТ 9454-78. При этом образец 1 определенных размеров располагается на опорах 2 и разрушается грузом 3 маятникового копра (рисунок 5. 1). Ударная проба может производиться при повышенной, пониженной и комнатной температурах.

За окончательный результат принимают работу (энергию) удара на разрушение или ударную вязкость. Под *ударной вязкостью* понимается работа, затраченная на разрушение образца и отнесенная к его площади поперечного сечения в месте концентратора, т.е. удельная работа. Чем выше ударная вязкость материала, тем он лучше сопротивляется динамическим нагрузкам.

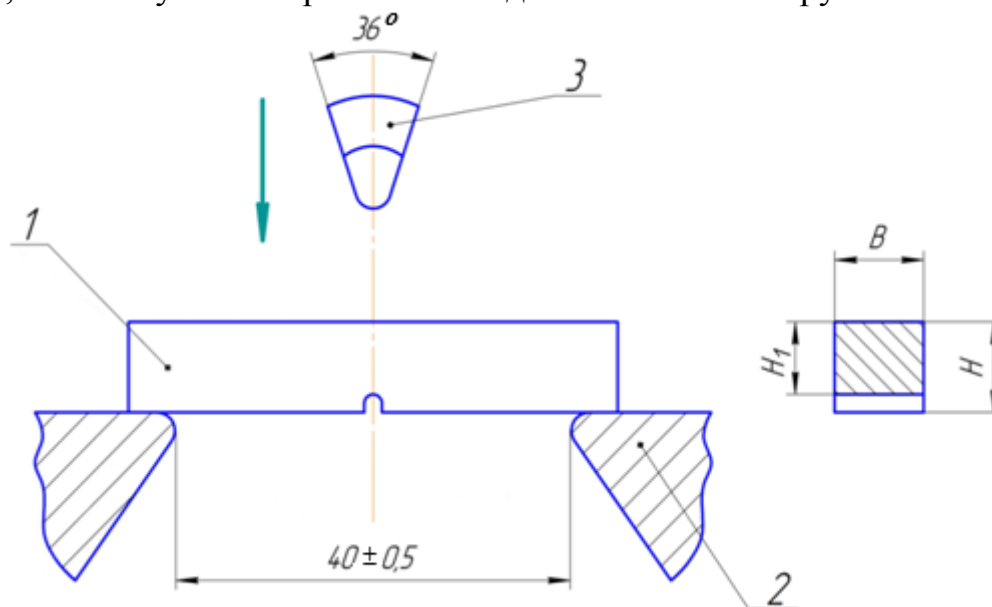


Рисунок 5.1 – Образец и схема его испытания на ударную вязкость

Так, для разрушения вязких материалов требуется затратить значительно больший объем энергии, чем для хрупких. Поэтому вязкие материалы хорошо противостоят ударам, а хрупкие от них легко разрушаются.

Ударную вязкость $KС$, Дж/м² (часто используется размерность системы СГС, т.е. кгс·м/см²) определяют по формуле:

$$KС = \frac{A_n}{F_o}, \quad (5.1)$$

где A_n – работа, затраченная на излом образца, Дж (кгс·м);

F_o – начальная площадь поперечного сечения образца в месте надреза, м² (см²), т.е. $F_o = H_1 \cdot B$.

Изучение вязкости материалов имеет большое практическое значение. Детали многих машин, кузнечных молотов, штампов, станков и других механизмов подвергаются действию удара. Гидравлический удар испытывают также детали трубопроводов. Следовательно, материал деталей должен иметь необходимую величину ударной вязкости. Так, например, для *стальных* деталей она должна быть *не менее 8 - 10 кгс·м/см²*. Ударная вязкость используется и при контроле качества металлов, так как результаты динамических испытаний более чувствительны к различным дефектам, возникающим в процессе производства и обработки (микротрещины, вредные примеси, неоднородность химического состава и т.д.); при оценке склонности металла к хладноломкости (переходу из вязкого состояния в хрупкое при понижении температуры).

У большинства цветных металлов (алюминий, медь и многие их сплавы) не представляется возможным определить ударную вязкость вследствие высокой пластичности этих материалов. Испытания на ударный изгиб надрезанных образцов также нецелесообразны в отношении чугунов, литых магниевых и алюминиевых сплавов, которые хрупко разрушаются при обычных статических испытаниях на растяжение.

Величина ударной вязкости зависит от материала образца, от его размеров и формы, а также от формы ударяющего тела. Поэтому испытание необходимо проводить в соответствии с требованием стандартов в их отношении с целью получения сравнимых результатов.

В зоне надреза создается объемное напряженное состояние, что так же, как и скорость удара, способствует проявлению хрупкости материала. В зависимости от вида концентратора на образце (рисунок 5.2) ударную вязкость различают и обозначают:

KCU – ударная вязкость для образца с надрезом вида U при комнатной температуре, максимальная энергия удара маятника – 300 Дж (30 кгс·м), глубина концентратора – 2 мм, ширина образца – 10 мм. Такие образцы применяются в общем машиностроении, когда не оговорены другие виды концентраторов;

KCV – ударная вязкость, определенная на образце с надрезом вида V при комнатной температуре (максимальная энергия удара маятника – 300 Дж, глубина концентратора – 2 мм, ширина образца – 10 мм). Образцы с концентратором этого типа используются при выборе приемо-сдаточных испытаний метал-

лов и сплавов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы, сосуды давления и т.п.);

КСТ – ударная вязкость образцов с усталостной трещиной **T**, предназначенных для сертификации наиболее ударостойких материалов. В них из малого **V** – образного надреза вырастает трещина усталости. Образцы с **T** надрезом применяются при выборе и приемочном контроле металлов и сплавов для особо ответственных конструкций, в которых оценка сопротивления развитию трещины имеет первостепенное значение.

Ударная вязкость существенно зависит от *температуры*. Для ее обозначения при пониженной и повышенной температурах вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытания. Например: **KCV**⁻⁴⁰ – ударная вязкость, измеренная на образце с концентратором вида **V** при температуре минус 40 °С; **КСТ**⁺¹⁰⁰ – с концентратором вида **T** при температуре плюс 100°С.

Основные параметры маятниковых копров нормированы ГОСТ 10708-76 «Копры маятниковые. Технические условия». Копры выпускаются с ручным и механическим приводом подъема маятника. Современные маятниковые копры имеют переменный запас энергии (от 4,903 до 2451,66 Дж).

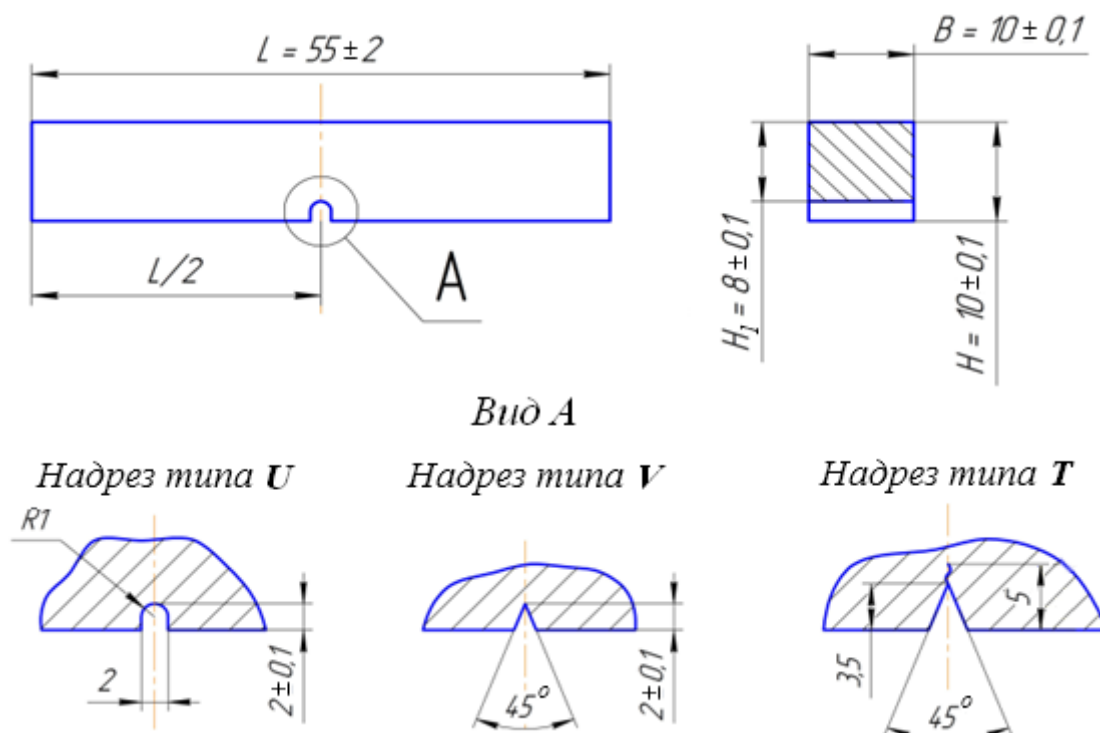


Рисунок 5.2 – Образец для испытания и типы концентраторов

В настоящей лабораторной работе нахождение величины ударной вязкости *стали* и *чугуна* производится на образцах с концентратором вида **U** (**KCU**) или **V** (**KCV**) с помощью маятникового копра модели **МК-30А** с предельной энергией 300 Дж (30 кгс·м), схема которого представлена на рисунке 5.3 а.

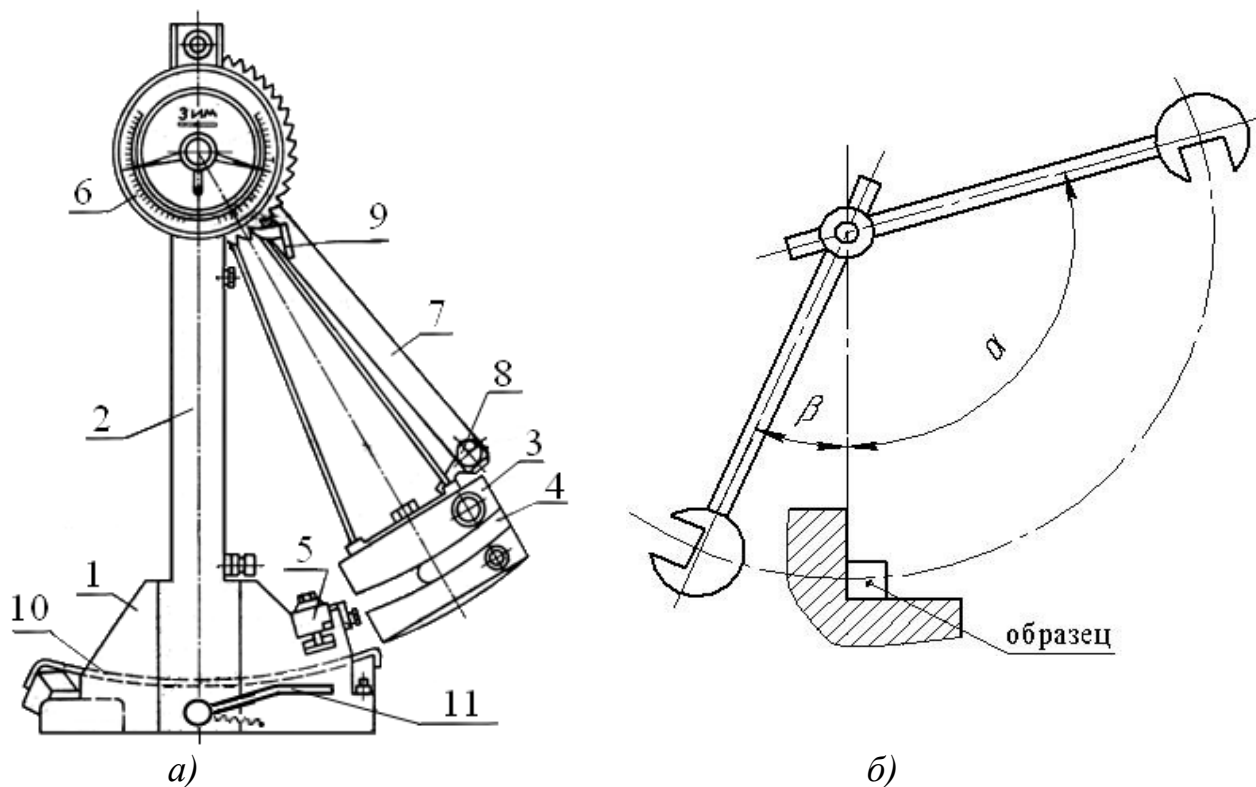


Рисунок 5.3 – Схема маятникового копра (а) и углы подъема α , взлета β его маятника (б)

К основным частям копра МК-30А относятся основание 1 и две вертикальные стойки 2. В верхней части стоек на оси, закрепленной в шарикоподшипниках, подвешен маятник 3. Он представляет собой металлический диск, в средней части которого есть вырез. В вырезе находится нож 4, разрушающий образец. На основании копра имеется опора 5, на которой размещают образец.

Круговая шкала 6 копра, показывающая величину энергии маятника, проградуирована в единицах *работы (энергии)*. Нуль шкалы находится в нижней части, от которого в обе стороны отмечены деления (цена деления 0,2 кгс·м). На шкале имеются *две* стрелки. Поводок, жестко укрепленный на оси маятника, поочередно отводит стрелки и оставляет их в положениях, отвечающих углам подъема α , т.е. величине начальной, запасенной энергии и углам взлета маятника β после разрушения образца (конечной, оставшейся энергии) (рисунок 5.3 б). До начала испытания необходимо проверить, чтобы обе стрелки совпадали с нулевой отметкой при свободно подвешенном маятнике.

Для того чтобы расположить маятник на различные начальные углы подъема α (изменить потенциальную энергию удара в зависимости от вязкости материала), копер снабжен подъемной рамкой 7, на конце которой укреплена защелка 8. С помощью защелки маятник присоединяется к подъемной рамке. В ее верхней части имеются фиксаторы 9, которые, перемещаясь по зубьям храповых секторов, устанавливают положение рамки, а значит, и маятника в различных углах α .

В копре имеется тормозное устройство - стальная лента 10. Лента одним концом прикреплена к станине, а другим соединена с ножной педалью 11. При

нажмем на педаль лента получает наибольший прогиб и не препятствует перемещению маятника, отпущенного с определенной высоты. После разрушения образца и возвращения маятника тормозная лента натягивается и останавливает его. Для того чтобы освободить маятник и снова поднять на угол α , нужно нажать на педаль.

Перед началом испытаний проверяют положение стрелок относительно нулевой отметки. При необходимости стрелки совмещают с этой отметкой. Образец помещают на опоры так, чтобы концентратор находился со стороны, *противоположной* удару ножа маятника, в плоскости его симметрии. Подъемную рамку располагают на нужной высоте в зависимости от размеров образца и материала, из которого он изготовлен. Маятник поднимают и закрепляют его защелкой к подъемной рамке. При этом маятник *обязательно* запирают, поворачивая предохранительный диск. Затем открывают его, освобождая защелку, и маятник свободно падает, разрушая образец.

Работу, затраченную на излом образца, определяют по шкале копра как разность между начальным запасом работы, задаваемым углом α , и энергии, оставшейся после разрушения по углу β (рисунок 5.3 б). Если разрушения не произошло, то испытание повторяют заново на новом образце.

Порядок выполнения работы

1 Замерить ширину и толщину образцов B и H_1 , т.к. при их изготовлении возможно отклонение от стандартных размеров. Указать вид концентраторов.

2 Ознакомиться с устройством маятникового копра. Обратит особое внимание на вопросы *техники безопасности* при проведении ударных испытаний, изложенные преподавателем. Обязательно использовать ограждение.

3 Слегка отклонить маятник в рабочем направлении и положить образец на опоры копра так, чтобы удар падающего маятника приходился со стороны, *противоположной* надрезу. При этом надрез должен находиться в одной плоскости с острием ножа маятника.

4 Повернуть рамку копра на высоту, необходимую для разрушения образца, т.е. соответствующую начальной энергии удара. Не рекомендуется задавать чрезмерно большую энергию удара по сравнению с необходимой, так как это снижает точность результатов испытания.

5 Поднять маятник до срабатывания защелки рамы и закрепить защелку стопором.

6 По шкале копра зафиксировать величину начальной запасенной маятником работы (энергии) A_1 , кгс \cdot м.

7 Открыть стопор защелки рамы и посредством рукоятки освободить защелку. При этом маятник свободно падает, разрушая образец.

8 По шкале копра записать величину оставшейся у маятника энергии A_2 , кгс \cdot м.

9 Определить работу A_n , затраченную на разрушение образца: $A_n = A_1 - A_2$.

10 Вычислить ударную вязкость материала KC (формула 5.1).

Отчет о работе

- 1 Название и цель работы.
- 2 Наименование и тип испытательной машины.
- 3 Эскиз образца с указанием размеров.
- 4 Схема установки образца на опорах маятникового копра (рисунок 5.1).
- 5 Результаты замеров и расчетов по пунктам 6, 8, 9 и 10 порядка выполнения работы (таблица 5.1):

Таблица 5.1 – Результаты опыта

Материал образца	Вид надреза	Площадь сечения F_0 , см ²	Величина энергии, кгс⊙м		Работа разрушения A_n , кгс⊙м	Ударная вязкость KC , кгс⊙м/см ²
			начальная A_1	конечная A_2		

Примечание: Если при испытании образец не был разрушен, то считается, что показатель качества материала не установлен. В этом случае в протоколе испытания указывают, что образец при заданной энергии удара не был разрушен.

Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под ударной вязкостью материала?
- 2 По какой формуле рассчитывается величина ударной вязкости?
- 3 Что характеризует ударная вязкость материала?
- 4 Как классифицируется ударная вязкость по виду концентратора на образце?
- 5 Перечислите области применения образцов в зависимости от применяемых типов концентраторов.
- 6 Как обозначается ударная вязкость при пониженной и повышенной температурах испытания?
- 7 Объясните устройство и принцип действия маятникового копра, используемого в лабораторной работе.
- 8 Как определяется работа, затрачиваемая на разрушение образца?

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 №2 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 длиномерные стойки, упоры, колонны, стержни ферм, штоки, стенки сосудов.

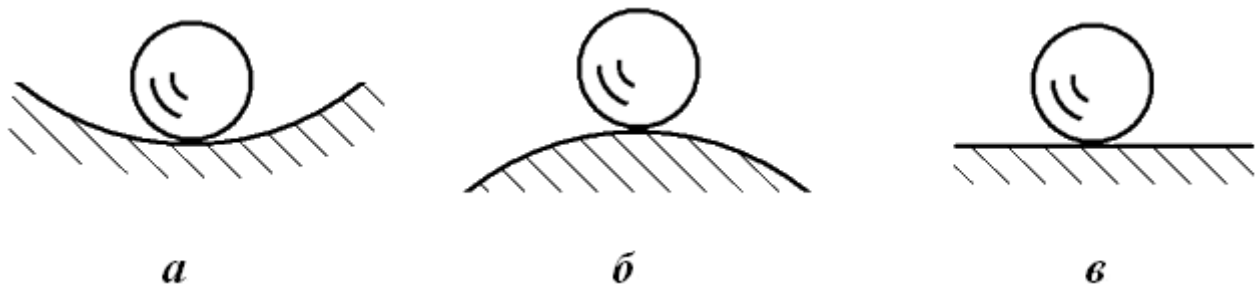


Рисунок 6.1 – Устойчивое (*а*), неустойчивое (*б*) и безразличное (*в*) равновесие тела

Обеспечение устойчивости конструкций входит в перечень трёх основных задач «Сопротивления материалов»: 1) расчёт на *прочность*; 2) расчёт на *жёсткость*; 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 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 $\sigma_{тц}$:

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

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 $P_{кр}^o$ 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).

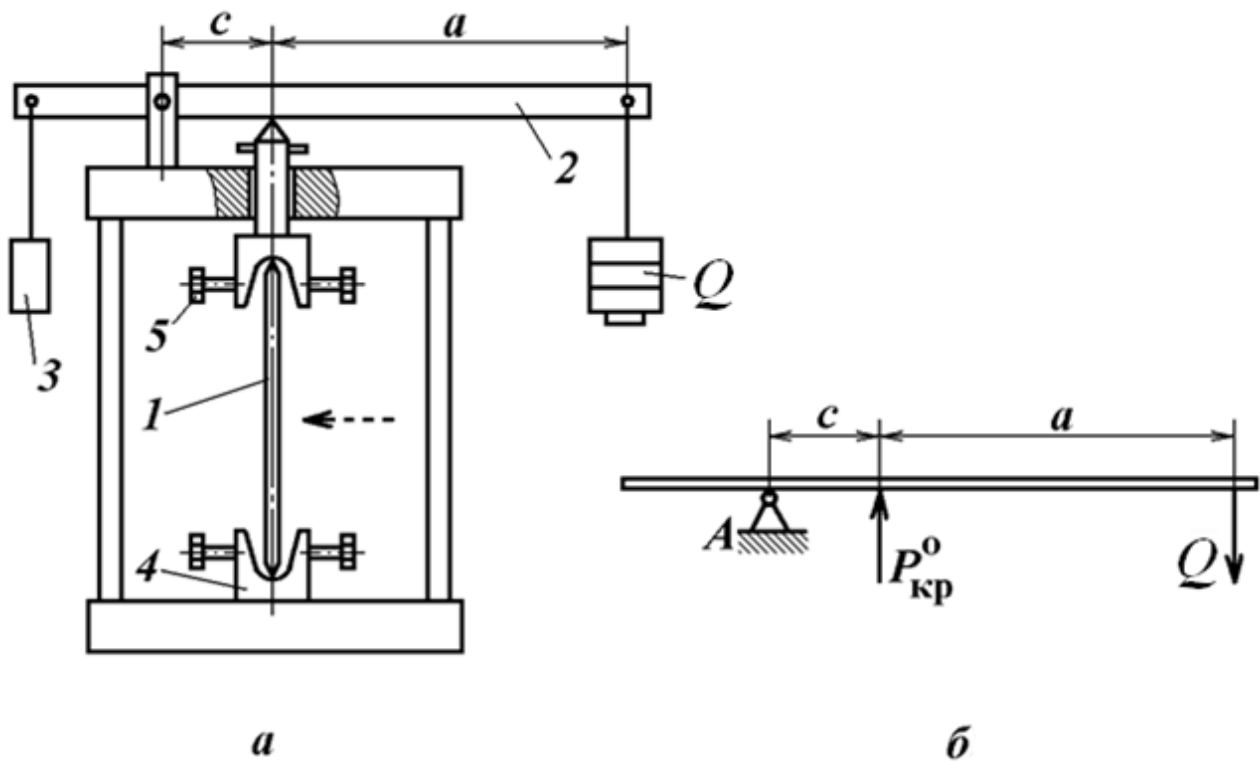


Рисунок 6.2 – Схема лабораторной установки (а) и нагрузочного рычага (б)

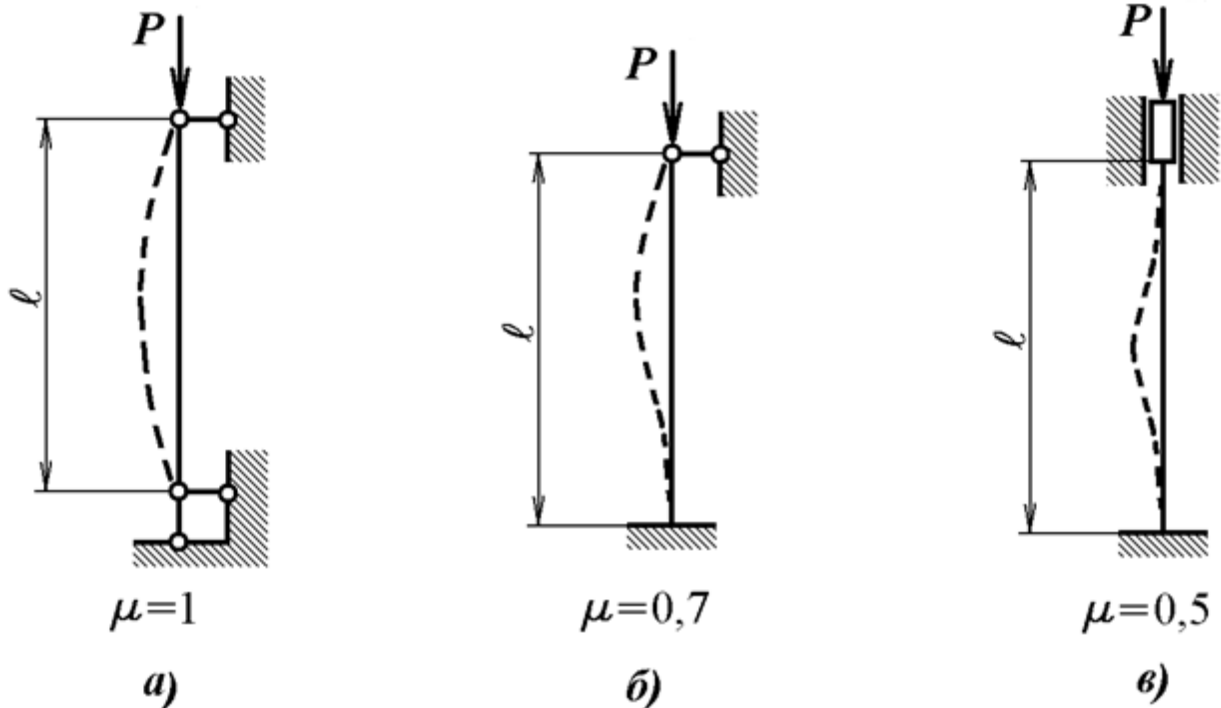
Лабораторная установка позволяет найти величины критической силы для сжимаемого стержня при трёх видах его закрепления (рисунок 6.3):

- 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 защемлён 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 , $\sigma_{нц}$.

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 $\sigma_{пл} = 200$ МПа;

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

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).

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 $P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(\mu l)^2}$			
Критическая сила опытная $P_{кр}^o$, Н			
Погрешность, % $\frac{P_{кр} - P_{кр}^o}{P_{кр}} \cdot 100\%$			

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.
- 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 вычисления предельной гибкости стержня?
- 11 Приведите примеры элементов трубопроводной арматуры или 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 зву-

ковыми 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 ($K_d = \frac{\delta_d}{\delta_c}$).

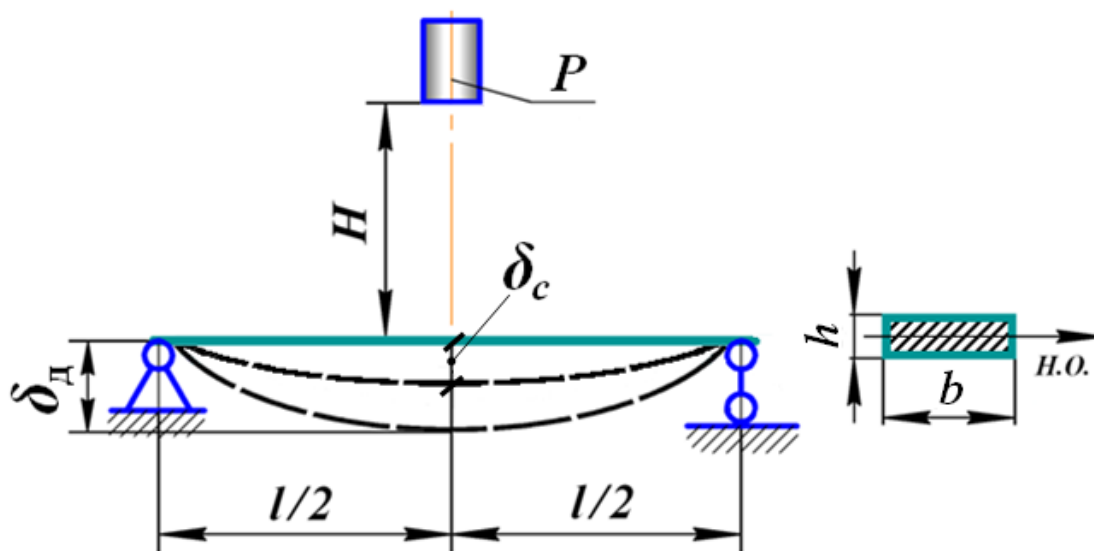


Рисунок 7.1 – Расчетная схема нагружения балки

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 $E = 2 \cdot 10^5$ МПа);

$J_{H.O.}$ – осевой момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси.

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

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

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_δ^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_δ^o отмечается подпружиненным карандашом 7 на миллиметровой бумаге.

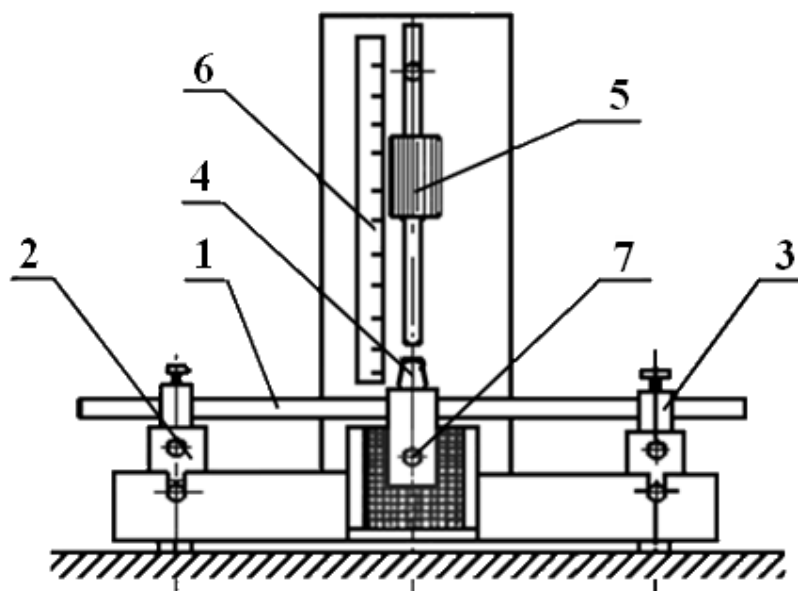


Рисунок 7.2 – Установка для определения перемещения

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:
 $J_{H.O.} = bh^3 / 12$.

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 $J_{H.O.}$, мм⁴:

$J_{H.O.} =$.

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_0^o и динамического коэффициента K_δ^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_0^o , мм	Динамический коэффициент		
			опытный $K_\delta^o = \frac{\delta_0^o}{\delta_c^o}$	теоретический K_δ	процент расхождения δ , %

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

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

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

12 Графики зависимости динамических коэффициентов K_δ и K_δ^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.

Список литературы

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

2 Вербицкая, А. Г. Определение механических свойств материалов [Текст] : учеб. пособие / А. Г. Вербицкая, В. И. Киринос. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 192 с.

3 Вольмир, А. С. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. С. Вольмир, Ю. П. Григорьев, В. А. Марьин, А. И. Станкевич. – Москва : Дрофа, 2006. – 352 с.

4 Гуревич, Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: Расчет трубопроводной арматуры [Текст] : учеб. пособие / Д. Ф. Гуревич. – Москва : Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.

5 Жуковец, И. И. Механические испытания металлов [Текст] : учеб. пособие / И. И. Жуковец. – Москва : Высш. шк., 1986. – 199 с.

6 Официальный сайт АО «Научно-производственная фирма «Центральное конструкторское бюро арматуростроения». URL : www.ckba.ru.

7 Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов [Текст] : учебник / М. Д. Подскребко. – Минск : Высш. шк., 2007. – 797 с.

8 Сайт для студентов технических вузов. URL : www.isopromat.ru.

9 Сопротивление материалов. Электронный учебный курс для студентов очной и заочной формы обучения. URL : www.soprotmat.ru.

10 Электронная библиотека. URL : www.twirpx.com/files/mechanics/sopromat/.

Коротовских Валентин Константинович
Тютрин Сергей Геннадьевич

**ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИСПЫТАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ**

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для магистрантов направления 15.04.01

Редактор Л.П. Чукомина

Подписано в печать 26.03.18	Формат 60×84 1/16	Бумага 65 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 3,0,00	Уч.-изд. л. 3,00
Заказ №51	Тираж 25	Не для продажи

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