



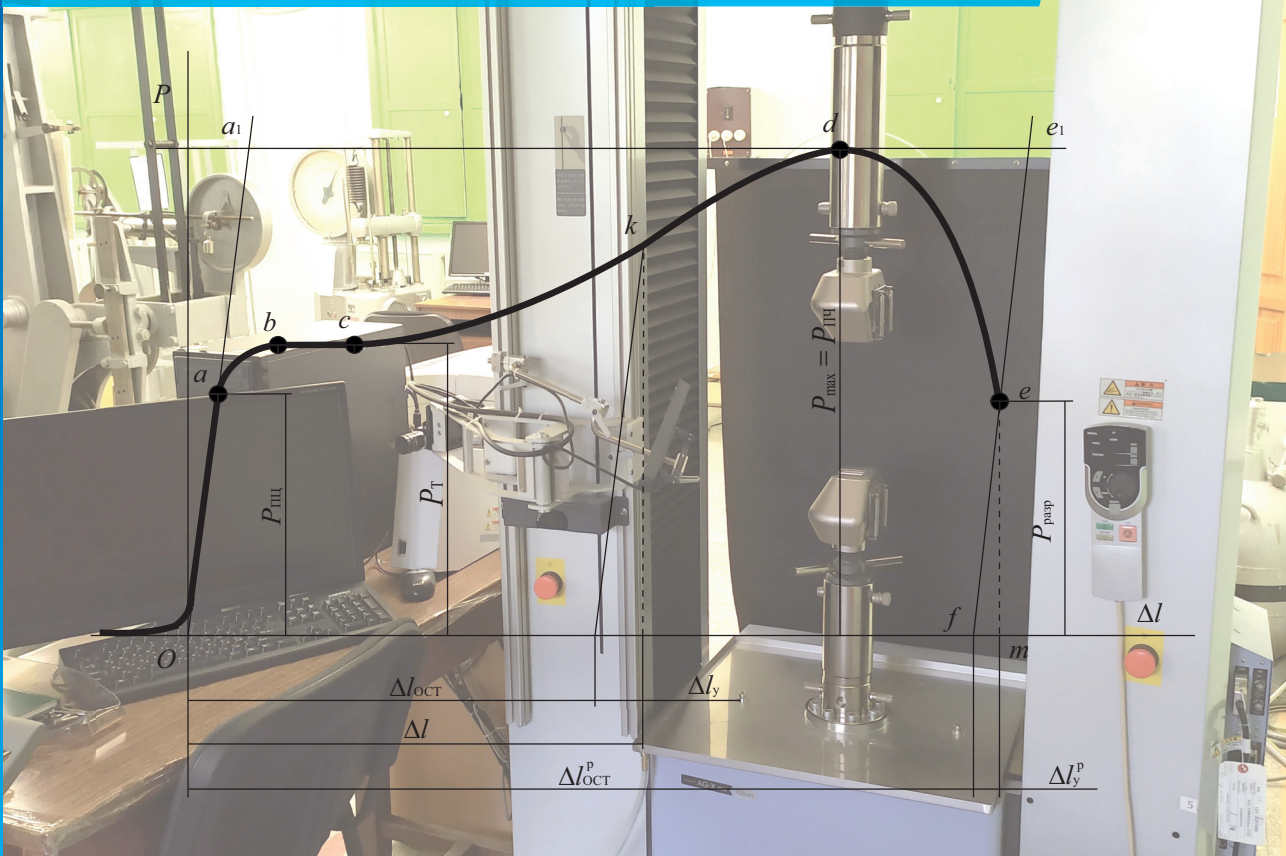
Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт
фундаментального
образования

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ПРОСТЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ

Практикум



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ПРОСТЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ

Практикум

Под общей редакцией д-ра физ.-мат. наук А. Н. Кислова

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов-бакалавров, обучающихся
по инженерно-техническим направлениям подготовки,
изучающих дисциплину «Соппротивление материалов»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 539.3(075.8)

ББК 30.121я73

С64

Авторы:

А. Н. Кислов (предисловие, лаб. раб. № 1, 6, приложения), О. С. Ковалев (лаб. раб. № 8), Н. А. Гусакова (лаб. раб. № 7), С. Е. Селезнева (лаб. раб. № 5), А. С. Ходак (иллюстрации), Д. Е. Черногубов (лаб. раб. № 2, 3), С. В. Чернобородова (лаб. раб. № 9), В. В. Чупин (лаб. раб. № 4)

Рецензенты:

кафедра математики Уральского государственного горного университета (завкафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Б. Сурнев*); д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Института машиноведения УрО РАН *И. Г. Емельянов*

Сопrotивление материалов. Простые виды деформации : практи-
С64 кум / А. Н. Кислов, О. С. Ковалев, Н. А. Гусакова [и др.] ; под общ. ред.
д-ра физ.-мат. наук А. Н. Кислова ; М-во науки и высшего образования
РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 112 с.

ISBN 978-5-7996-3392-9

В практикуме даны краткие сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ в курсе «Сопrotивление материалов» по темам, связанным с простыми видами деформации. Представлено описание лабораторных работ, приведены схемы используемых установок и измерительных приборов. Кроме того, изложена методика проведения работ и обработки полученных результатов. Наряду с порядком выполнения лабораторных работ приведены контрольные вопросы для самоподготовки.

Практикум рекомендован студентам всех инженерно-технических специальностей, изучающих дисциплину «Сопrotивление материалов».

Библиогр.: 2 назв. Рис. 59. Табл. 17. Прил. 2.

УДК 539.3(075.8)

ББК 30.121я73

ISBN 978-5-7996-3392-9

© Уральский федеральный
университет, 2021

Содержание

Предисловие	4
Лабораторная работа № 1 Испытание малоуглеродистой стали статической нагрузкой на растяжение	5
Лабораторная работа № 2 Испытание материалов на сжатие	19
Лабораторная работа № 3 Электротензометрирование и тарировка датчиков омического сопротивления	28
Лабораторная работа № 4 Растяжение стального образца с измерением упругих деформаций ...	40
Лабораторная работа № 5 Испытание стального круглого образца на кручение	49
Лабораторная работа № 6 Проверка линейного закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при чистом изгибе	59
Лабораторная работа № 7 Определение напряжений в балке при прямом поперечном изгибе ...	70
Лабораторная работа № 8 Определение перемещений при прямом изгибе балки	82
Лабораторная работа № 9 Исследование деформации растяжения цилиндрической винтовой пружины	93
Библиографический список	105
Приложение 1	106
Приложение 2	109

Предисловие

В лабораторном практикуме представлены учебные материалы, необходимые для теоретической подготовки к выполнению девяти лабораторных работ по темам, связанным с простыми видами деформации, которые предусмотрены в курсе «Сопротивление материалов». Изучаются следующие виды деформации: растяжение-сжатие, кручение и прямой изгиб. Выполнение лабораторных работ позволит студентам закрепить на практике теоретические знания, полученные на лекциях.

Данный практикум служит дополнением к существующим учебным пособиям по сопротивлению материалов. В нем по каждой лабораторной работе приводятся краткие теоретические сведения, даются основные формулы, необходимые для проведения численных расчетов, описываются экспериментальные установки, приводятся требования к оформлению отчета. В расчетах следует обращать внимание на единицы измерения величин, которые входят в формулы.

Представленные материалы могут использоваться студентами при самостоятельной подготовке к проведению лабораторных работ.

Лабораторная работа № 1

Испытание малоуглеродистой стали статической нагрузкой на растяжение

В данной работе проводится испытание образца, изготовленного из пластичного материала, статической нагрузкой на одноосное растяжение.

Цель работы — экспериментально определить численные значения основных механических характеристик малоуглеродистой стали.

Краткие теоретические сведения

Объекты из пластичных материалов (сталь, медь, алюминий и др.) разрушаются при больших нагрузках после появления значительных остаточных деформаций. Испытание на растяжение статической нагрузкой таких материалов является наиболее простым и распространенным видом механических испытаний. Оно сопровождается изучением всех стадий деформации образца при растяжении с доведением нагрузки до значения, приводящего к разрыву образца.

Статические испытания дают возможность определять значения характеристик механических свойств материала через измерение усилий и деформаций. Механическими характеристиками называются величины, позволяющие оценить прочность, пластичность и вязкость материала. К прочностным характеристикам относятся предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности (временное сопротивление) и истинное сопротивление разрыву. Показателями пластичности являются относительное остаточное удлинение после разрыва и относительное остаточное сужение поперечного сечения после разрыва. Характеристикой вязкости является удельная работа внешних сил, затрачиваемая на разрушение единицы объема материала.

В испытаниях используются пропорциональные цилиндрические (рис. 1.1) или плоские образцы рабочей длины l_1 с головками на концах для закрепления их в захватах испытательной машины. Для коротких образцов круглого поперечного сечения диаметр d_0 и расчетная длина l_0 (длина участка, расположенного между двумя неглубокими кернами) удовлетворяют равенству $l_0 = 5d_0$.

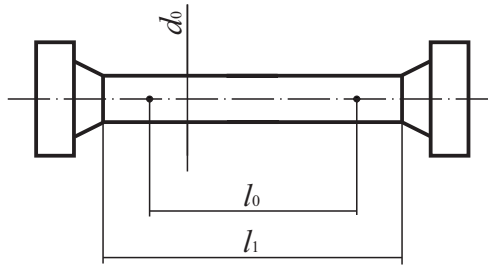


Рис. 1.1. Стандартный образец цилиндрической формы

Статические испытания на растяжение проводят на разрывных или универсальных машинах различного типа, которые состоят из нагружающего и силоизмеряющего механизмов. Общий вид современной универсальной испытательной машины представлен на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Общий вид универсальной испытательной машины Shimadzu AG-X plus

В ходе испытания образца на растяжение специальным устройством машины автоматически записывается график, представляющий собой зависимость между возрастающим усилием, которое равно нагрузке P , и абсолютным удлинением $\Delta l = l - l_0$ образца до момента его разрыва. Этот график называется *машинной диаграммой растяжения*. На рис. 1.3 показан типичный вид такой диаграммы для некоторых пластичных материалов. При обработке диаграммы растяжения на кривой выделяют участки, как указано на рис. 1.3.

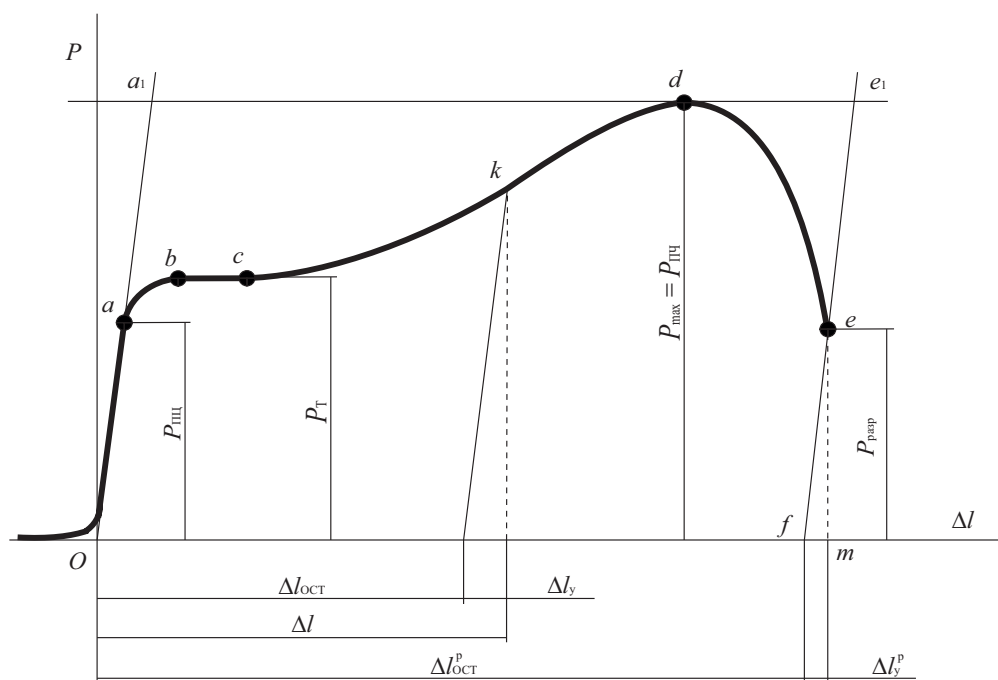


Рис. 1.3. Вид диаграммы растяжения образца из малоуглеродистой стали

На начальной стадии до начала деформации образца (точка O) перемещение подвижного захвата происходит без нагружения образца или с небольшим увеличением нагрузки, которая устраняет зазоры как в механизме машины, так и между головками образца и захватами. Поэтому на диаграмме появляется сначала горизонтальный, а затем криволинейный участок.

Участок от точки O (начало диаграммы) до a . Этот участок диаграммы является отрезком прямой линии. Он выражает прямую пропорциональную зависимость между усилием и абсолютной продольной

деформацией. Здесь наблюдается линейное изменение деформации от усилия, поэтому выполняется закон Р. Гука. Наибольшее усилие, обозначаемое $P_{\text{пц}}$, при котором справедлив этот закон, соответствует *пределу пропорциональности* $\sigma_{\text{пц}}$ — наибольшему напряжению, превышение которого вызывает отклонение от закона Гука:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{A_0},$$

где A_0 — площадь поперечного сечения рабочей части образца до испытания.

Кривой участок ab . При дальнейшем нагружении образец испытывает продольную деформацию Δl , которая может быть упругой Δl_y и остаточной (пластической) $\Delta l_{\text{ост}}$:

$$\Delta l = \Delta l_y + \Delta l_{\text{ост}}.$$

Упругая деформация исчезает после снятия нагрузки, как на участке Oa , остаточная — сохраняется.

Близко к точке a на искривленном участке ab можно отметить точку с ординатой, соответствующей *пределу упругости* σ_y — наибольшему напряжению, при котором в материале возникает только упругая деформация. Для большинства материалов предел упругости совпадает с пределом пропорциональности.

Горизонтальный участок bc . После перехода через участок ab деформация начинает интенсивно нарастать без дальнейшего увеличения усилия P_t , материал образца «течет». Это усилие соответствует *пределу текучести* σ_t — напряжению, при котором деформация растет без заметного увеличения усилия:

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A_0}.$$

Для высокоуглеродистых и легированных сталей, ряда сплавов цветных металлов площадка текучести отсутствует. В этом случае за предел текучести условно принимают напряжение $\sigma_{0,2}$, при котором остаточное удлинение образца равно 0,2% от его первоначальной длины.

Участок кривой линии от точки c до d . После площадки текучести материал вновь начинает сопротивляться деформациям, связь между усилием и удлинением нелинейная. Если в точке k разгрузить образец,

то разгрузка будет проходить по линии, параллельной начальному линейному участку Oa диаграммы. После разгрузки деформация уменьшится до остаточной. Если повторно нагрузить вытянутый образец, то линия нагрузки практически совпадет с линией разгрузки. Материал образца изменит свои механические свойства: повысится предел пропорциональности и уменьшится пластичность материала. Это явление называется «наклепом» или *упрочнением материала* образца.

Ордината точки d кривой равна в масштабе диаграммы максимальному усилию $P_{пч}$, после которого материал образца начинает претерпевать разрушение. Оно соответствует *пределу прочности* или *временному сопротивлению* $\sigma_{в(пч)}$ — максимальному напряжению, которое выдерживает образец, не разрушаясь,

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0}.$$

Отметим, что предел пропорциональности, предел текучести и предел прочности являются условными характеристиками, поскольку соответствующие им усилия относятся к площади сечения A_0 образца до испытания.

Участок кривой от точки d до e . После достижения максимального усилия деформация образца начинает концентрироваться около наиболее слабого места. На образце образуется так называемая шейка (рис. 1.4). Из-за резкого уменьшения площади сечения «шейки» для дальнейшего растяжения образца нужна меньшая нагрузка. На диаграмме наблюдается снижение усилия, продолжающееся до разрыва образца.

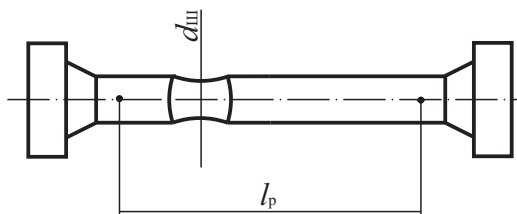


Рис. 1.4. Образец с «шейкой» после разрыва

В точке e кривая диаграммы обрывается вследствие разрыва образца по наименьшему сечению «шейки». Усилие $P_{разр}$ в момент разрыва образца называется разрушающим. Разделив его на площадь по-

перечного сечения $A_{ш}$ в месте разрушения образца, получим *истинное сопротивление разрыву*

$$\sigma_{и} = \frac{P_{разр}}{A_{ш}},$$

$\sigma_{и}$ — истинное напряжение, при котором происходит разрыв образца.

При изучении механических свойств материала удобно пользоваться диаграммой растяжения, устанавливающей связь между нормальным напряжением σ и относительной деформацией ε , другими словами, *диаграммой условных напряжений* при растяжении (рис. 1.5).

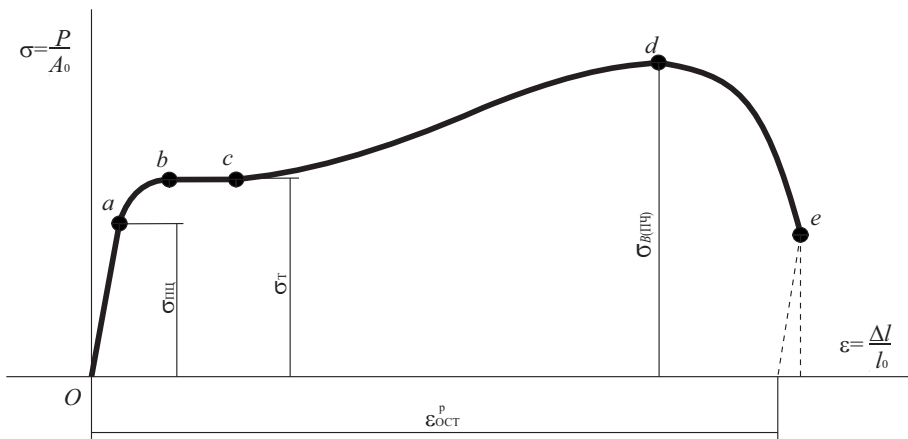


Рис. 1.5. Условная диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали

По диаграмме растяжения также вычисляются характеристики пластичности в процентах: *остаточное относительное удлинение* после разрыва

$$\delta = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100 \%$$

и *относительное остаточное поперечное сужение* после разрыва

$$\psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} \cdot 100 \%,$$

где l_0 и l_p — расчетные длины образца до испытания и после разрыва соответственно; A_0 и $A_{ш}$ — площади поперечного сечения рабочей части образца до испытания и в месте разрыва образца соответственно.

Важной энергетической характеристикой является работа внешних сил, затрачиваемая на разрыв образца. Чем больше эта величина,

тем больше энергии в состоянии поглотить образец, не разрушаясь, и тем лучше он будет сопротивляться нагрузкам, поглощая механическую энергию.

Работа A , затрачиваемая на разрушение образца, равна площади диаграммы растяжения $Oabcdef$ (с учетом масштабов усилия и деформации). Работу A можно вычислить по формуле

$$A = \eta P_{\max} \Delta l_{\text{ост}}^p,$$

где η — коэффициент полноты диаграммы, учитывающий отличие площади параллелограмма Oa_1ef со сторонами, равными P_{\max} и $\Delta l_{\text{ост}}^p$, от действительной площади диаграммы. В зависимости от марки стали коэффициент полноты диаграммы может принимать значения от 0,8 до 0,9. В наших испытаниях малоуглеродистой стали примем $\eta = 0,85$.

Статической вязкостью, характеризующей сопротивляемость материала образца внешнему воздействию, является *удельная работа разрушения* при растяжении, которая равна работе разрушения, приходящейся на единицу объема,

$$a_{\text{уд}} = \frac{A}{V_0},$$

где A — работа, затраченная на разрушение образца; V_0 — начальный объем расчетной части образца.

Описание лабораторной установки

Статическое испытание на растяжение цилиндрического образца из малоуглеродистой стали осуществляется на разрывной машине ИМ-4Р (рис. 1.6) с записывающим приспособлением, автоматически вычерчивающим диаграмму растяжения на бумаге в крупном масштабе (рис. 1.3). На кинематической схеме (рис. 1.7) виден нагружающий механизм, включающий винт 4 с шестерней и захваты 2 и 3, в которых головками закрепляется исследуемый образец. Шестерня приводится во вращение электродвигателем 5 через промежуточную систему зубчатых зацеплений. При вращении шестерни винт 4 опускается вниз, нагружая образец. Усилие передается плечу рычага 1 и через промежуточную тягу передается маятнику 7. В результате этого маятник отклоняется пропорционально приложенной нагрузке.



Рис. 1.6. Общий вид разрывной машины ИМ-4Р

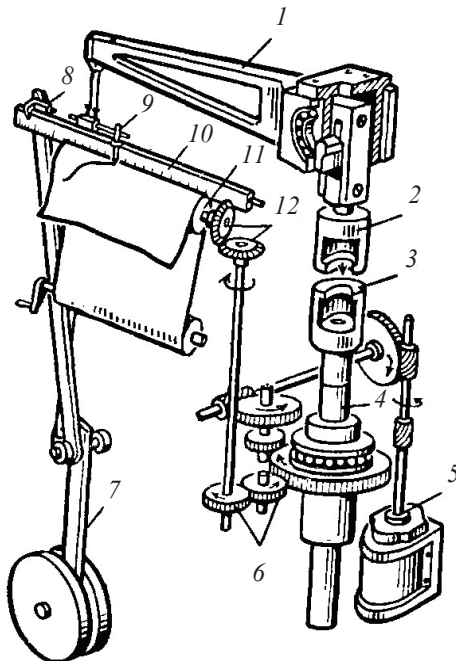


Рис. 1.7. Кинематическая схема разрывной машины ИМ-4Р:

1 — рычаг с промежуточной тягой; 2, 3 — захваты; 4 — винт с шестерней; 5 — электродвигатель; 6, 12 — зубчатые колеса; 7 — маятник с грузом; 8 — рычаг; 9 — каретка с пером; 10 — шкала; 11 — валик с бумагой

В силоизмеряющий механизм входит рычаг 8, который связан с маятником 7. Этот рычаг передвигает каретку 9 с пером, заправленным чернилами, которое записывает величину усилия на бумаге, натянутой на валик 11. Величину усилия можно оценивать по шкале 10. Поворот валика осуществляется через зубчатую передачу 12 от шестерни винта 4, поэтому он пропорционален перемещению винта, а значит, деформации образца.

Порядок выполнения работы

1. Перед установкой цилиндрического образца в захваты разрывной машины ИМ-4Р произвести измерение его расчетной длины l_0 и диаметра d_0 штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Замер диаметра сделать не менее трех раз в различных сечениях по длине l_1 . В расчет принять наименьшее значение диаметра d_0 . По результатам произведенного обмера вычислить площадь поперечного сечения $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ и объем расчетной части образца $V_0 = A_0 l_0$.
2. Установить образец в захваты машины 2 и 3 (рис. 1.7) с помощью двух вкладышей и разъемных сухариков. Образец закладывается во вкладыши, фиксируется там сухариками, затем собранная система вставляется в захваты машины. Для ликвидации больших зазоров в захватах после установки образец слегка «натягивают» до начала нагружения. Изменение расстояния между захватами регулируется вращением винта 4.
3. Зацепить каретку 9 с пером за рычаг 8. Отклонение маятника 7 и рычага 8 пропорционально нагрузке, растягивающей образец. Значит, перемещение пера каретки вдоль оси P тоже пропорционально силе, растягивающей образец.
4. Прижать миллиметровую бумагу к валику 11, соединенному с ходовой частью 12 машины, и проверить отсутствие перекосов бумаги.
5. Включить электродвигатель машины на «растяжение», создавая нагрузку на образец.
6. В процессе испытания вести наблюдение за поведением образца и за характером диаграммы, вычерчиваемой записывающим устройством машины.

7. Остановить испытательную машину после разрыва образца и освободить обе части образца из захватов.
8. Тщательно и плотно прижать друг к другу части образца по месту обрыва и измерить расчетную длину l_p и диаметр «шейки» $d_{ш}$ штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Диаметр $d_{ш}$ замерить в наиболее узком месте «шейки» в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и в расчет принять среднее арифметическое значение. Вычислить площадь сечения $A_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^2}{4}$.
9. Снять миллиметровую бумагу с записанной на ней диаграммой растяжения и обработать ее (рис. 1.3):
 - а) совместить ось абсцисс (ось удлинения) с нулевой линией диаграммы; чтобы исключить начальный криволинейный участок диаграммы, возникающий из-за первоначального обмятия головок образца в захватах машины, проводят ось ординат (ось усилия) через начало координат, которое находят, продолжив прямолинейный участок диаграммы до пересечения с осью абсцисс;
 - б) измерить с помощью линейки $P_{пц}$, P_t , $P_{пч}$, $P_{разр}$ и определить соответствующие усилия, учитывая масштаб диаграммы по оси усилия; на маятнике 7 подвешен груз, при котором на диаграмме по оси P одному сантиметру соответствует 1000 Н усилия;
 - в) провести прямую ef параллельно прямой Oa и измерить линейкой $\Delta l_{ост}^p$; учитывая, что масштаб диаграммы по оси Δl удлинения 100:1, определить абсолютное остаточное удлинение расчетной длины образца.
10. Вычислить прочностные характеристики малоуглеродистой стали и нарисовать диаграмму условных напряжений при растяжении.
11. Вычислить показатели пластичности малоуглеродистой стали и удельную работу, затрачиваемую на разрушение образца.
12. Оформить отчет по требуемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Схема и размеры образца.
5. Таблица с результатами измерений.
6. Машинная диаграмма растяжения и диаграмма условных напряжений.
7. Вычисления прочностных характеристик, показателей пластичности и работы, затраченной на разрушение образца.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что называется механическими характеристиками материала?
2. Назовите и опишите участки диаграммы растяжения пластичного материала.
3. Какие величины относятся к прочностным характеристикам материала? Дайте их определения.
4. Какие величины относятся к показателям пластичности материала? Дайте их определения.
5. В чем заключается отличие упругих деформаций от пластических (остаточных)?
6. Какую диаграмму называют диаграммой условных напряжений?
7. Как определяется работа, затрачиваемая на разрушение образца?

Отчет о лабораторной работе № 1 Испытание малоуглеродистой стали на растяжение

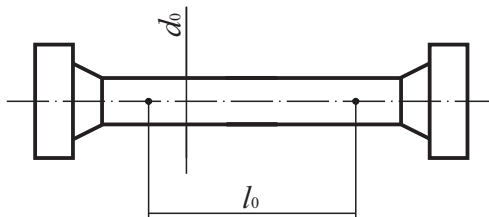
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

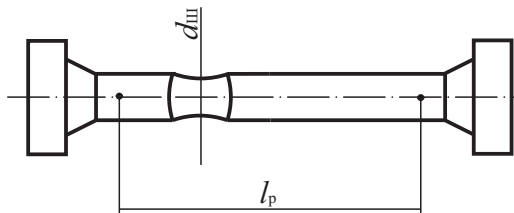
Испытательная машина: _____
Измерительные приборы: _____

Схема и размеры образца

До испытаний



$l_0 =$ мм; $d_0 =$ мм; $A_0 =$ = мм²; $V_0 =$ = мм³.
После разрыва



$l_p =$ мм; $d_{III} =$ мм; $A_{III} =$ = мм².

Масштаб диаграммы по оси усилия 1 см = Н.

Масштаб диаграммы по оси удлинения 1 см = мм.

Машинная диаграмма растяжения

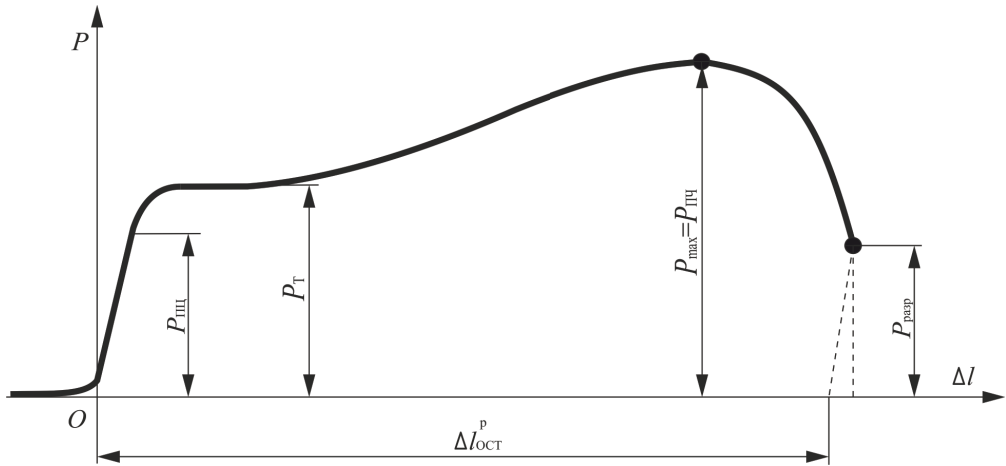


Таблица экспериментальных данных

Усилие, соответствующее	кН
пределу пропорциональности, $P_{пц}$	
пределу текучести, $P_{т}$	
пределу прочности, $P_{пч}$	
разрушению образца, $P_{разр}$	

Прочностные характеристики

Предел пропорциональности

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{A_0} = \quad = \quad \text{МПа,}$$

предел текучести

$$\sigma_{т} = \frac{P_{т}}{A_0} = \quad = \quad \text{МПа,}$$

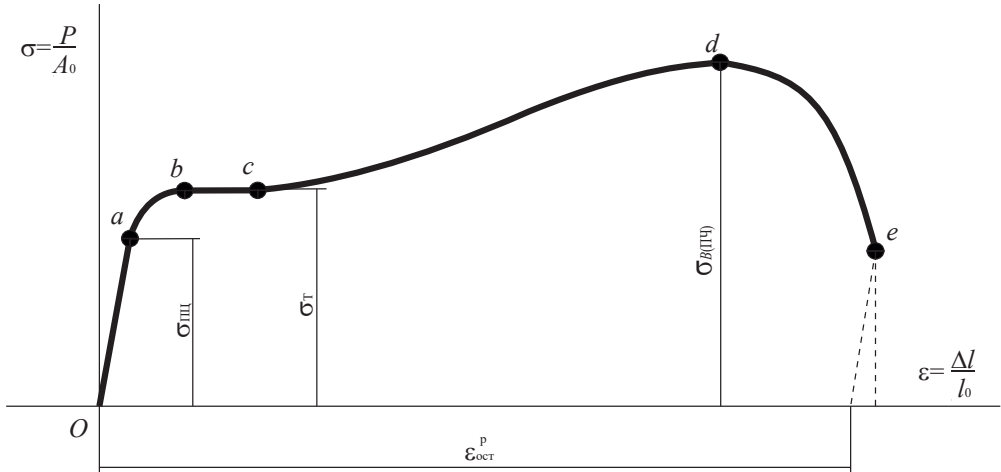
предел прочности

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0} = \quad = \quad \text{МПа,}$$

истинное сопротивление разрыву

$$\sigma_{и} = \frac{P_{разр}}{A_{ш}} = \quad = \quad \text{МПа.}$$

Диаграмма условных напряжений



Показатели пластичности

Относительное остаточное удлинение

$$\delta = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100 \% = \quad = \quad \%;$$

относительное остаточное поперечное сужение

$$\psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} \cdot 100 \% = \quad = \quad \%.$$

Работа, затрачиваемая на разрушение образца

$$A = \eta P_{\max} \Delta l_{\text{ост}}^p = \quad = \quad \text{Дж}.$$

Удельная работа разрушения при растяжении

$$a_{\text{уд}} = \frac{A}{V_0} = \quad = \quad \text{Дж/м}^3.$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял _____

Лабораторная работа № 2

Испытание материалов на сжатие

В данной работе проводится испытание образцов, изготовленных из различных материалов, статической нагрузкой на сжатие.

Цель работы — сравнительное изучение свойств различных материалов при сжатии и определение их пределов прочности.

Краткие теоретические сведения

При испытании на сжатие пластичных материалов (сталь, медь, алюминий и пр.) определяются пределы пропорциональности и текучести. Образцы из таких материалов при сжатии не разрушаются, а сплющиваются, превращаясь в диск, за счет развития больших пластических деформаций. Поэтому предела прочности при сжатии для пластичных материалов не существует.

Хрупкие материалы (чугун, стекло, бетон и пр.) при сжатии разрушаются. При этом они выдерживают значительно большие нагрузки, чем при растяжении. Испытание на сжатие таких материалов и определение их пределов прочности имеет большое практическое значение, так как детали машин и элементы конструкций, изготовленные из хрупких материалов, чаще всего работают на сжатие.

1. Испытание на сжатие чугунного образца

Для испытаний применяются цилиндрические образцы (рис. 2.1, б) с отношением высоты к диаметру $\frac{h}{d} = 1,5$. Под действием сжимающей силы образец в продольном направлении укорачивается, а в поперечном расширяется. Но благодаря силам трения между торцами образца и плитами пресса в этих местах поперечные деформации затрудне-

ны, и образец принимает слегка бочкообразную форму (рис. 2.1, в). Такая форма образца остается и после разрушения, что свидетельствует о наличии небольших пластических деформаций. Диаграмма сжатия практически линейна до момента разрушения образца (рис. 2.1, а).

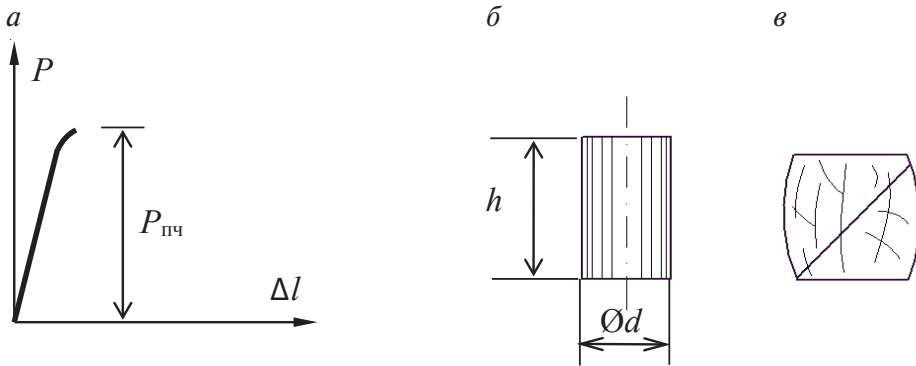


Рис. 2.1. Диаграмма сжатия (а) и вид образца до (б) и после опыта (в)

Разрушение образца происходит внезапно с образованием наклонной трещины под углом 45° к его оси, т. е. по площадке, на которой действуют наибольшие касательные напряжения (рис. 2.1, в).

Предел прочности чугуна при сжатии определяется следующим образом:

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0},$$

где $P_{пч}$ — разрушающая сила, A_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца (до опыта).

2. Испытание на сжатие цементного камня

Цементный камень получается путем затворения водой сухой цементно-песчаной смеси. Вода и цемент превращаются в цементное тесто, которое при перемешивании обволакивает зерна песка. При взаимодействии цемента с водой происходит химическая реакция — гидратация цемента, в процессе которой цементно-песчаная смесь превращается в цементный камень.

Для испытаний на сжатие изготавливаются образцы в виде кубиков (рис. 2.2, б). Сжимая их на испытательной машине, получают диаграмму. Диаграмма сжатия цементного камня представляет собой типовую диаграмму сжатия хрупкого материала, которая практически линейна до момента разрушения образца (рис. 2.2, а).

Из диаграммы следует, что образец разрушается без заметного остаточного укорочения. Характер разрушения образца изображен на рис. 2.2, в.

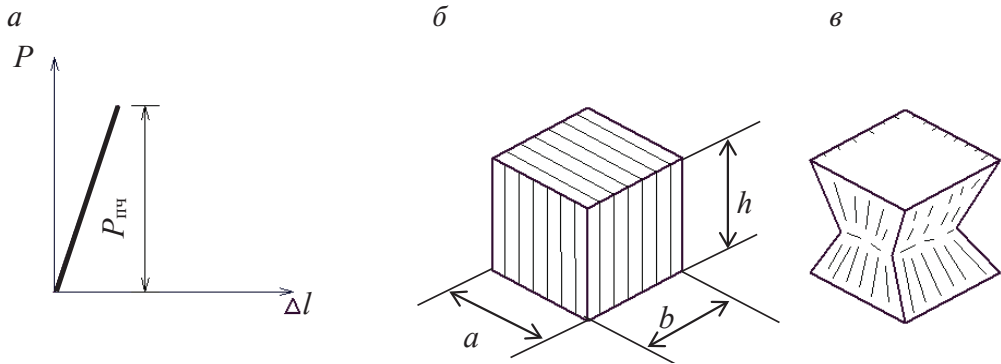


Рис. 2.2. Диаграмма сжатия (а) и вид образца до (б) и после опыта (в)

При сжатии кубика в вертикальном (продольном) направлении в горизонтальном (поперечном) он расширяется. Хрупкий материал плохо сопротивляется растяжению, и у него появляются продольные трещины. Но благодаря взаимодействию торцов образца с плитами пресса возникают силы трения, величины которых максимальны у торцов и убывают к середине. Эти силы препятствуют образованию трещин. Таким образом, разрушение кубика начинается с выкрашивания вертикальных граней и завершается переходом к форме двух усеченных пирамид, соединенных между собой меньшими основаниями (рис. 2.2, в).

Предел прочности цементного камня при сжатии определяется следующим образом:

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0},$$

где $P_{пч}$ — разрушающая сила, A_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца (до опыта).

3. Испытание деревянных образцов на сжатие

Древесина является анизотропным материалом, т. е. обладает разными свойствами в различных направлениях. Такие свойства обусловлены волокнистым строением материала. При изучении свойств древесины выделяют два главных направления: вдоль волокон и поперек волокон. Вдоль волокон дерево обладает наибольшими прочностными

и упругими свойствами, а поперек волокон — наименьшими. Анизотропию древесины учитывают при проектировании конструкций. Дерево следует располагать так, чтобы сжимающие или растягивающие усилия действовали вдоль волокон.

Для испытаний на сжатие применяют образцы в виде кубиков (рис. 2.3, б, в).

При сжатии вдоль волокон разрушение образца происходит за счет образования поперечных складок, обмятия торцов и образования продольных трещин (рис. 2.3, з), при этом материал имеет сравнительно небольшие остаточные деформации (рис. 2.3, а, кривая 1).

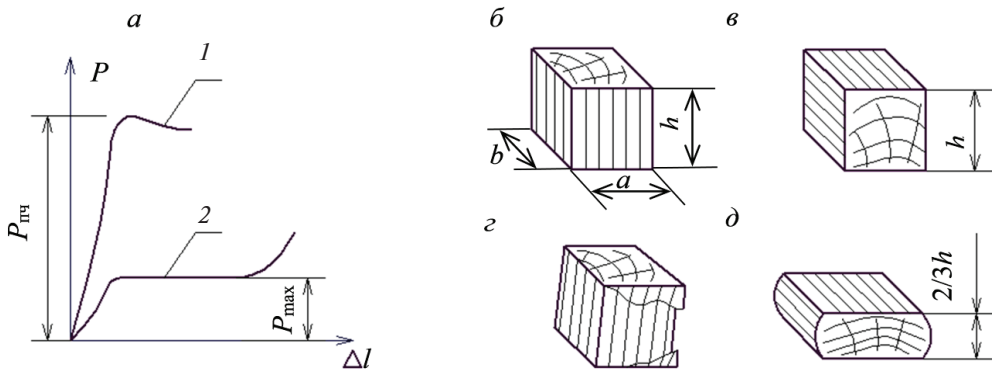


Рис. 2.3. Диаграммы сжатия (а) и вид образцов до (б, в) и после опыта (з, д)

Предел прочности определяется следующим образом:

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0}.$$

Сжатие дерева поперек волокон отличается вязкостью и происходит с сильным развитием деформаций (рис. 2.3, а, кривая 2). Разрушения кубика при этом не происходит, он спрессовывается (рис. 2.3, д). Поэтому условно считают, что разрушающая сила — это сила, при которой кубик сжимается на 1/3 своей первоначальной высоты.

Предел прочности (условный) вычисляется по формуле

$$\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{max}}{A_0},$$

где P_{max} — нагрузка, при которой кубик сжался на 1/3 своей первоначальной высоты.

Описание лабораторной установки

Статические испытания образцов на сжатие проводятся на универсальной машине УММ-20 с максимальной нагрузкой 200 кН (20000 кгс) (рис. 2.4). На схематическом плане, изображенном на рис. 2.5, показана сама машина 5 и пульт управления 4, включающий в себя силоизмеритель, насосную установку, создающую рабочее усилие, и систему управления. Машина устроена по принципу гидравлического пресса, в котором подвижная траверса 3, перемещаясь вверх, сжимает образец, расположенный между траверсой и неподвижным упором 1, рабочее усилие создается гидравлическим насосом высокого давления. В пульте управления установлен силоизмеритель маятнико-гидравлического типа, а также диаграммный аппарат барабанного типа для вычерчивания диаграммы сжатия испытываемого образца. Сжимающее усилие определяется по шкале силоизмерителя 2.



Рис. 2.4. Общий вид универсальной машины УММ-20

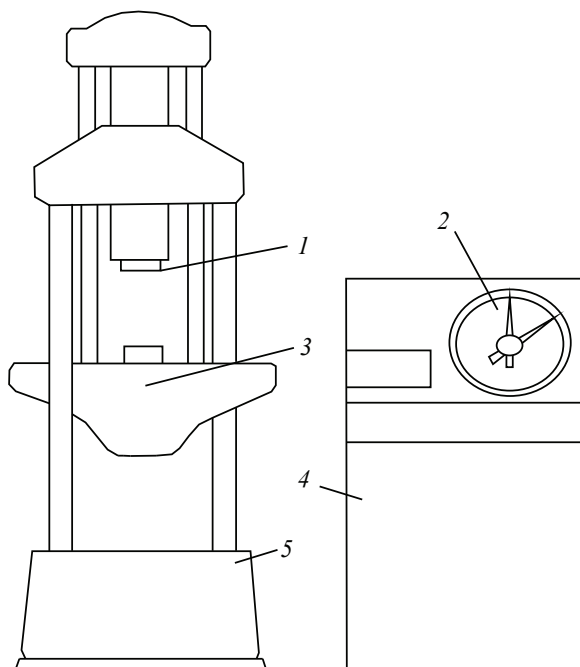


Рис. 2.5. Схематическое устройство машины УММ-20:

1 — неподвижный упор; 2 — шкала силоизмерителя; 3 — подвижная траверса;
5 — испытательная машина; 4 — пульт управления

Порядок выполнения работы

Для всех образцов из разных материалов.

1. Изобразить схему испытуемого образца до опыта.
2. Произвести измерение образца штангенциркулем и записать его размеры.
3. Установить образец на подвижную траверсу по центру пресса.
4. Произвести нагружение образца до разрушения.
5. Определить по шкале силоизмерителя разрушающую нагрузку.
6. Снять образец и изобразить вид разрушенного образца после опыта.
7. Оформить отчет по прилагаемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Схема и размеры образцов до опыта.
5. Вид образцов после опыта.
6. Разрушающие нагрузки.
7. Пределы прочности.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какие механические характеристики прочности определяют при испытании на сжатие у пластичных, а какие — у хрупких материалов?
2. Каким образом разрушается чугунный образец при сжатии?
3. Сравните диаграммы сжатия для пластичного и хрупкого материалов и объясните их различие.
4. Объясните характер разрушения цементного камня при сжатии.
5. В чем отличие диаграмм при сжатии дерева вдоль и поперек волокон?

Отчет о лабораторной работе № 2

Испытание материалов на сжатие

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Испытательная машина: _____
 Измерительные приборы: _____

1. Испытание на сжатие чугунного образца

Вид образца до опыта	Размеры	Вид образца после опыта
	Диаметр $d =$ мм. Высота $h =$ мм. Площадь сечения $A_0 =$ мм ²	

Разрушающая нагрузка $P_{пч} =$ кгс = Н.

Предел прочности $\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0} =$ МПа.

2. Испытание на сжатие образца из цементного камня

Вид образца до опыта	Размеры	Вид образца после опыта
	Длина $a =$ мм. Ширина $b =$ мм. Высота $h =$ мм. Площадь сечения $A_0 =$ мм ²	

Разрушающая нагрузка $P_{пч} =$ кгс = Н.
 Предел прочности $\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0} =$ = МПа.

3. Испытание на сжатие деревянного образца

а) сжатие вдоль волокон

Вид образца до опыта	Размеры	Вид образца после опыта
	Длина $a =$ мм. Ширина $b =$ мм. Высота $h =$ мм. Площадь сечения $A_0 =$ мм ²	

Разрушающая нагрузка $P_{пч} =$ кгс = Н.
 Предел прочности $\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0} =$ = МПа.

б) сжатие поперек волокон

Вид образца до опыта	Размеры	Вид образца после опыта
	Длина $a =$ мм. Ширина $b =$ мм. Высота $h =$ мм. Площадь сечения $A_0 =$ мм ²	

Разрушающая нагрузка $P_{пч} =$ кгс = Н.
 Предел прочности $\sigma_{в(пч)} = \frac{P_{пч}}{A_0} =$ = МПа.

Выводы по работе: _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 3

Электротензометрирование и тарировка датчиков омического сопротивления

В данной работе проводится испытание на осевое растяжение плоского стального стержня с измерением упругих продольных деформаций.

Цель работы — знакомство с электротензометрическим методом измерения деформаций, а также с тарировкой проволочных тензометров.

Краткие теоретические сведения

Электротензомерами называются электрические устройства для измерения малых упругих деформаций нагруженных элементов конструкций. Они имеют преимущества по сравнению с другими типами тензометров (рычажными, зеркальными): высокую точность, чувствительность, возможность применения при динамических нагрузках. Электротензометр состоит из измерительного тензодатчика омического сопротивления (тензорезистора), источника питания и регистрирующего прибора (измерительного моста с гальванометром).

Тензорезистор представляет собой решетку из нескольких петель очень тонкой ($10 \div 40$ мкм) проволоки из константана (сплав меди с никелем) или нихрома (сплав никеля, железа и хрома), заклеенную между двумя листами тонкой бумаги (рис. 3.1). *Базой тензорезистора* называется длина петель решетки l .

Наиболее распространены тензорезисторы с базой, равной 5, 10, 20 мм и сопротивлением $R = 50 \div 200$ Ом. Для измерения деформаций тензорезистор приклеивается к очищенной поверхности изучаемого образца специальным клеем, и его проволочная решетка полностью воспринимает все деформации детали (деформации детали и тензо-

резистора одинаковы). Выводы тензорезистора соединяются с регистрирующим прибором.

После приложения нагрузки исследуемый образец деформируется, такую же деформацию получает решетка тензорезистора, в результате чего изменяются ее геометрические размеры и, следовательно, электрическое сопротивление.

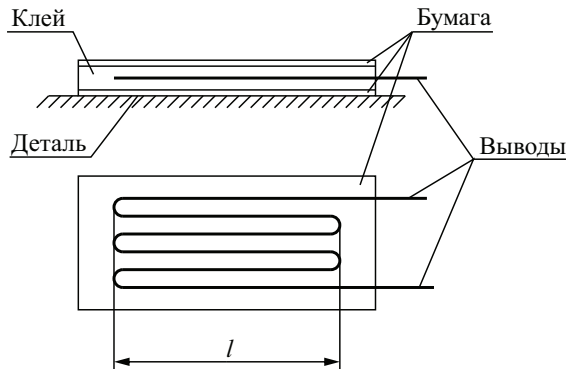


Рис. 3.1. Датчик омического сопротивления (тензорезистор)

Изменение сопротивления тензорезистора очень мало и составляет величину порядка $0,01 \div 0,1$ Ом. Чтобы измерить такое малое изменение сопротивления, необходимы высокоточные регистрирующие приборы. Наибольшее распространение получил измерительный мост Уитстона, который обладает высокой чувствительностью к изменению сопротивления.

Мост состоит из четырех сопротивлений (плеч) R_1, R_2, R_3, R_4 , соединенных в виде четырехугольника (рис. 3.2). В одну из диагоналей моста включен источник питания, а в другую гальванометр (Γ). Ток, проходящий через гальванометр, вычисляется из закона Кирхгофа:

$$I_{\Gamma} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_2 R_3},$$

где U — напряжение источника питания.

Из этой формулы следует, что если сопротивления моста удовлетворяют соотношению

$$R_1 R_3 = R_2 R_4,$$

то тока в гальванометре не будет, т. е. мост уравновешен или сбалансирован.

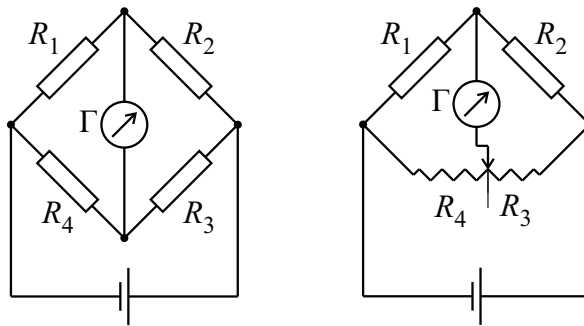


Рис. 3.2. Мост Уитстона (слева) и принципиальная схема регистрирующего прибора (справа)

В качестве сопротивлений R_1 и R_2 в мост включаются тензорезисторы. Тензорезистор с сопротивлением R_1 — рабочий тензорезистор (измерительный датчик). Он приклеивается на исследуемый образец и деформируется вместе с ним. Сопротивление рабочего тензорезистора изменяется не только вследствие деформации образца, но и при изменении его температуры. Для того чтобы исключить влияние температуры образца на показания прибора, в качестве сопротивления R_2 в мост включается такой же тензорезистор с сопротивлением $R_2 = R_1$. Этот датчик приклеивается к отдельной недеформируемой пластинке из того же материала, что и испытываемый образец. Пластина с наклеенными на них тензорезисторами и образец находятся в одинаковых температурных условиях и при изменении температуры сопротивления R_1 и R_2 изменяются на одинаковую величину. При этом равенство $R_1 R_3 = R_2 R_4$ не нарушается и мост остается уравновешенным. Тензорезистор R_2 компенсирует изменение сопротивления рабочего тензорезистора, возникшее вследствие изменения температуры. Поэтому его называют компенсационным.

Для измерения деформаций одновременно в нескольких точках образца в измерительных схемах установлены сразу несколько описанных мостов — каналов. Известны десяти-, двадцати-, сорока- и сто-канальные тензомосты.

Определение деформаций производится нулевым методом. Сопротивления R_3 и R_4 (рис. 3.2) выполнены в виде реохорда (реостата) со скользящим контактом. Перед нагружением образца мост балансируют, изменяя соотношение сопротивлений $R_3 : R_4$ (перемещая контакт реохорда) до тех пор, пока стрелка гальванометра не покажет ноль.

По шкале регистрирующего прибора берется первый отсчет n_1 . Далее нагружается образец, который деформируется вместе с наклеенным на его поверхности рабочим тензорезистором. Сопротивление тензорезистора R_1 изменяется, в диагонали моста появляется ток, и стрелка гальванометра отклоняется от нуля. Производится вторичная балансировка моста — перемещением рукоятки реохорда до нулевого показания гальванометра. Записывается второй отсчет n_2 по шкале прибора.

Разность отсчетов

$$\Delta n = n_2 - n_1$$

пропорциональна деформации тензорезистора и образца. Таким образом, зная цену деления прибора K_ε , можно вычислить относительную деформацию образца в направлении наклеенного тензорезистора

$$\varepsilon = K_\varepsilon \Delta n.$$

Цена деления прибора устанавливается опытным путем, т. е. путем тарировки.

Тарировка датчиков

Цель тарировки электротензометра состоит в том, чтобы установить, какой деформации соответствует одно деление шкалы прибора.

В качестве эталона деформаций принята деформация плоского стального образца при осевом растяжении под действием приложенной нагрузки P (рис. 3.3). Во всех поперечных сечениях такого образца нормальные напряжения одинаковы на достаточном удалении от точек закрепления, зависят от усилия, которое равно нагрузке P , и определяются по формуле

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (3.1)$$

где $A = bh$ — площадь поперечного сечения образца.

Учитывая закон Гука и выражение (3.1), получаем формулу для расчета относительной линейной продольной деформации

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{bhE}, \quad (3.2)$$

где E — модуль продольной упругости (модуль Юнга) материала образца.

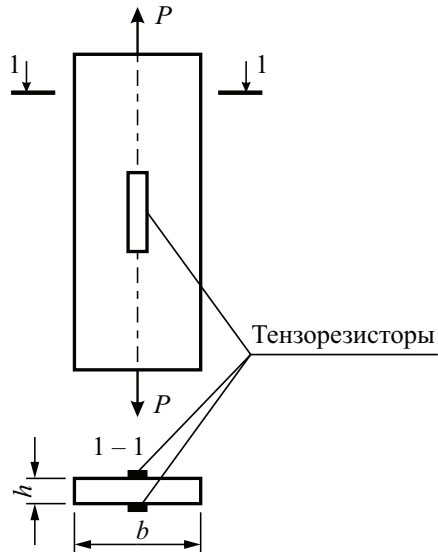


Рис. 3.3. Схема образца и расположения тензорезисторов

Зная относительную продольную деформацию ε , определяем цену деления шкалы электротензомера по деформациям

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\Delta n}.$$

Из этой формулы следует, что

$$\varepsilon = \Delta n K_\varepsilon.$$

Для линейного напряженного состояния нормальное напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma = \varepsilon E = \Delta n K_\varepsilon E = \Delta n K_\sigma,$$

где $K_\sigma = K_\varepsilon E$ — цена деления шкалы электротензомера по напряжениям, Па.

Описание лабораторной установки

Растяжение стального образца проводится на разрывной машине Р-5 с предельной нагрузкой 50 кН (5000 кгс) (рис. 3.4). Она состоит из четырех обязательных частей: нагружающего механизма, сило-

измерительного устройства, хватных приспособлений и станины. На рис. 3.5 показана принципиальная схема разрывной машины Р-5. Образец 2 закрепляется в захватах 1 и 3. Он представляет собой плоский стержень прямоугольного поперечного сечения, на каждой широкой стороне которого вдоль оси стержня наклеен тензорезистор (рис. 3.3). Нагрузке образца производится вручную с помощью вращения рукоятки 5, при этом нижний захват перемещается вниз с помощью винта 4. Нагрузка определяется по шкале силоизмерителя 6.



Рис. 3.4. Общий вид испытательной машины Р-5

В качестве регистрирующего прибора электротензометра применяется универсальный многоканальный регистратор «Терем» (рис. 3.6), у которого в пластмассовом корпусе размещены печатная плата, дисплей, клавиатура, батарейный отсек. На торцевой стенке прибора находятся разъемы для подключения модулей тензорезисторов и персонального компьютера.

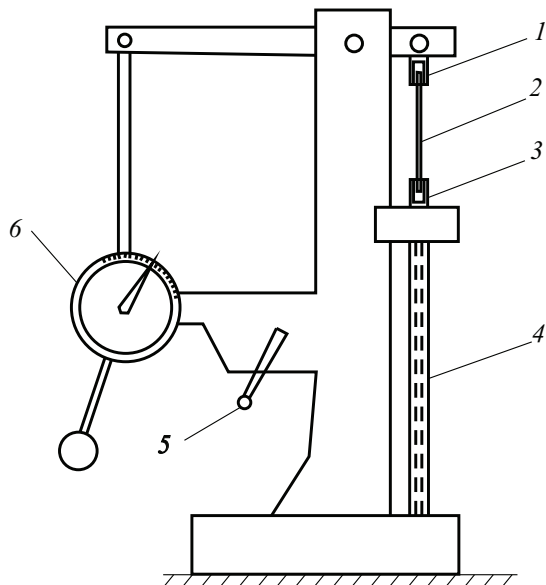











Рис. 3.5. Принципиальная схема разрывной машины Р-5:

1, 3 — захваты; 2 — образец; 4 — винт с шестерней; 5 — рукоятка для нагружения;
6 — шкала силоизмерителя

Рис. 3.6. Универсальный многоканальный регистратор «Терем»

Назначение кнопок на лицевой панели:

	— включение и выключение прибора;
	— перевод прибора в режим измерения;
	— вход в главное меню из режима измерения; — вход и выход из пунктов главного меню и подменю с сохранением выполненных изменений;
	— включение и выключение подсветки дисплея;
 	— навигация по меню прибора; — последовательное перемещение курсора между строками меню;
 	— управление курсором (мигающий знак, цифра и т. п.) в режиме установки рабочих параметров; — просмотр памяти результатов;
	— выход из различных подменю без сохранения внесенных изменений; — изменение номера модуля/датчика

Порядок выполнения работы

На образце заранее наклеены два тензорезистора. Каждый тензорезистор включен в схему тензомоста вместо рабочего сопротивления R_1 и подключен к многоканальному регистрирующему прибору «Терем». Тензометрический мост уравнивается прибором автоматически.

1. Произвести измерение размеров поперечного сечения плоского стального образца b и h .
2. Нагрузить образец начальной нагрузкой P_0 (для обжатия в захватах машины). За величиной силы наблюдать по шкале силоизмерителя установки в единицах кгс (самостоятельно перевести в Н).

3. С экрана регистрирующего прибора переписать показания n_1^0 и n_2^0 с двух тензорезисторов и занести их в таблицу экспериментальных данных.
4. Произвести первую ступень нагружения образца силой ΔP .
5. С экрана регистрирующего прибора переписать показания n_1^1 и n_2^1 с двух тензорезисторов и занести их в таблицу экспериментальных данных. Вычислить приращения $\Delta n_1^1 = n_1^1 - n_1^0$ для первого тензодатчика и $\Delta n_2^1 = n_2^1 - n_2^0$ для второго тензодатчика.
6. Произвести последующие ступени нагружения с регистрацией и записью в таблицу показаний прибора по каждому тензорезистору. Затем произвести расчет приращений показаний.
7. Вычислить относительную линейную продольную деформацию образца на ступени нагрузки ΔP с помощью формулы (3.2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{bhE}.$$

8. Определить цену деления шкалы электротензометра по деформациям

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\Delta n_{\text{cp}}},$$

где Δn_{cp} — среднее арифметическое приращение Δn_j^i на каждой ступени нагружения по двум тензорезисторам.

9. Определить цену деления шкалы прибора по напряжениям K_σ , Па:

$$K_\sigma = K_\varepsilon E.$$

10. Оформить отчет по прилагаемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Схема и размеры образца.

5. Относительная линейная деформация на ступень нагрузки.
6. Таблица с показаниями прибора.
7. Цена деления шкалы тензометра по деформациям и по напряжениям.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Из каких основных частей состоит электротензометр?
2. Объясните устройство проволочного тензорезистора.
3. Как устроена электрическая мостовая схема?
4. Что понимается под тарировкой электротензометра?
5. Как производится тарировка электротензометра?
6. Для чего в измерительный мост ставится компенсационный датчик?
7. Как определить цену деления шкалы электротензометра по напряжениям?

Отчет о лабораторной работе № 3
Электротензометрирование и тарировка
датчиков омического сопротивления

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Испытательная машина: _____
 Измерительные приборы: _____

Схема электротензометра

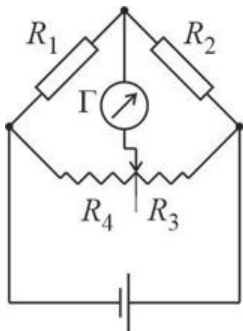
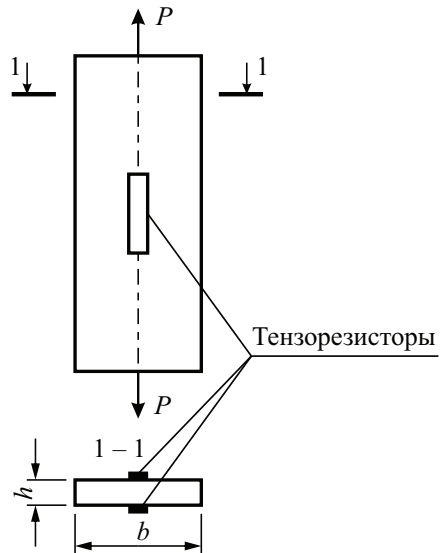


Схема образца



Размеры образца: $b =$ см; $h =$ см.

Модуль продольной упругости $E =$ МПа.

Относительная линейная деформация $\varepsilon = \frac{\Delta P}{bhE} =$ = .

Таблица экспериментальных данных

Нагрузка, P_i		Показания и приращения показаний электротензометра, в дел. шкалы прибора			
		Тензорезистор 1		Тензорезистор 2	
кгс	Н	n_1^i	Δn_1^i	n_2^i	Δn_2^i
			X		X

Среднее арифметическое приращение показаний электротензо-метра с двух тензорезисторов на ступень ΔP нагрузки

$$\Delta n_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i,j=1}^m \Delta n_j^i}{m} = \dots$$

Здесь m — количество всех значений Δn_j^i в таблице по двум тензорези-сторам.

Цена деления шкалы электротензометра

$$K_\epsilon = \frac{\epsilon}{\Delta n_{\text{cp}}} =$$

$$K_\sigma = K_\epsilon E = \quad = \quad \text{МПа.}$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял _____

Лабораторная работа № 4

Растяжение стального образца с измерением упругих деформаций

В лабораторной работе выполняется испытание стального стержня прямоугольного поперечного сечения на осевое растяжение в пределах упругих деформаций.

Цель работы — экспериментальная проверка закона Гука при растяжении и определение значений модуля продольной упругости (модуля Юнга) и коэффициента Пуассона стали.

Краткие теоретические сведения

При малых деформациях растяжения выполняется *закон Гука*, согласно которому нормальное напряжение σ пропорционально относительной продольной деформации ε :

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (4.1)$$

а коэффициентом пропорциональности E является *модуль продольной упругости*. Он характеризует способность материала сопротивляться растяжению (сжатию) при упругой деформации.

Упругие свойства материала характеризует также *коэффициент Пуассона* μ , который зависит от природы материала. Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации) равен отношению относительной поперечной деформации ε' к относительной продольной деформации ε , взятому по модулю:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|. \quad (4.2)$$

В настоящей работе для определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона используется плоский стальной образец прямоугольного поперечного сечения, который подвергается испытанию на рас-

тяжение в пределах упругих деформаций. Для измерения продольных и поперечных деформаций в образце используется электротензометрический метод, изложенный в лабораторной работе № 3. С этой целью на двух поверхностях образца наклеены в продольном и поперечном направлениях тензорезисторы (рис. 4.1).

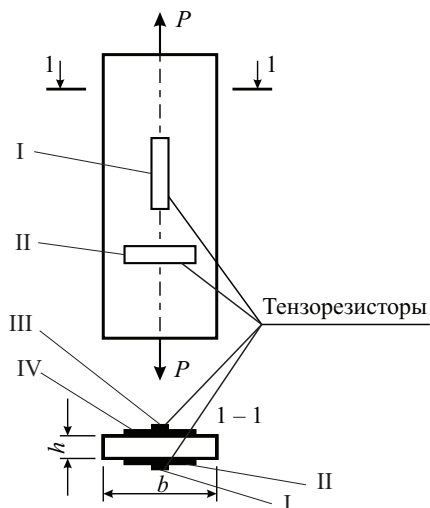


Рис. 4.1. Схема образца и расположения тензорезисторов

Опытная проверка закона Гука при растяжении производится на основе экспериментально полученной диаграммы растяжения (рис. 4.2), которая строится по результатам испытаний.

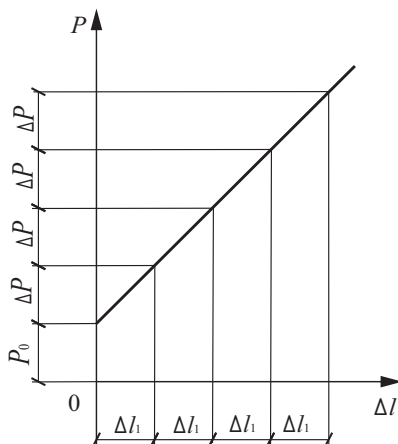


Рис. 4.2. Диаграмма растяжения в области упругих деформаций

Она представляет собой зависимость между возрастающим усилием, равным нагрузке P , и абсолютным удлинением $\Delta l = l - l_0$. Справедливость закона Гука (4.1) устанавливается наличием на диаграмме прямолинейного участка. Для иллюстрации линейной зависимости между усилием и удлинением нагружение образца осуществляют несколькими равными ступенями нагрузки ΔP :

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta P l}{E A},$$

где Δl_1 — абсолютное удлинение отрезка длиной, равной базе тензорезистора продольной деформации l , на ступень нагрузки ΔP , A — площадь поперечного сечения образца.

Опираясь на это выражение, можно получить формулу для модуля Юнга материала

$$E = \frac{\Delta P l}{\Delta l_1 A}. \quad (4.3)$$

Зная среднее приращение показаний Δn_1^{cp} электротензометра при продольной деформации (из таблицы экспериментальных данных) и цену деления его шкалы по деформациям K_ε , можно вычислить относительную продольную деформацию образца

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_1}{l} = \Delta n_1^{\text{cp}} K_\varepsilon. \quad (4.4)$$

Цена деления электротензометра устанавливается опытным путем (см. лабораторную работу № 3).

Подставляя в выражение (4.3) правую часть равенства (4.4), получим формулу для расчета значения модуля Юнга

$$E = \frac{\Delta P}{A \Delta n_1^{\text{cp}} K_\varepsilon}. \quad (4.5)$$

Относительная поперечная деформация образца вычисляется по формуле

$$\varepsilon' = \Delta n_2^{\text{cp}} K_{\varepsilon'},$$

где Δn_2^{cp} — среднее приращение показаний электротензометра при поперечной деформации (берется из таблицы экспериментальных данных), $K_{\varepsilon'}$ — цена деления электротензометра для поперечной деформации.

Если характеристики (база, цена деления) электротензометра при продольной и поперечной деформации одинаковы, то согласно выражению (4.2) величина коэффициента Пуассона определяется по формуле

$$\mu = \left| \frac{\Delta n_2^{\text{cp}}}{\Delta n_1^{\text{cp}}} \right|. \quad (4.6)$$

Описание лабораторной установки

В данной работе используется разрывная машина Р-5 с максимальным усилием 50 кН (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Общий вид машины Р-5 для испытаний на растяжение

На рис. 4.4 схематически показано устройство разрывной машины Р-5. В ней используется маятниковый силоизмеритель, а в качестве силовозбудителя — винт. При испытании на растяжение образец 2 закладывают концами в захваты 1 и 4 машины. Нижний захват перемещается с помощью винта 5. Гайка 6, приводимая в движение электромотором или вращением рукоятки 3, перемещает в вертикаль-

ном направлении винт 5, вызывая растяжение образца. Усилие, создаваемое вращением гайки, передается на образец и уравнивается через систему рычагов противовесом Q , помещенным на маятнике. Величина усилия откладывается в масштабе 500 Н в 1 мм на диаграммном барабане 8, а также может регистрироваться по шкале силоизмерителя 10. Деформации образца фиксируются на барабане в масштабе 2:1 при повороте барабана под действием натянутой нити 9. Тормоз 7 в виде веревки, переброшенной через шейку и снабженной грузом на конце, удерживает маятник при его падении, не допуская значительного перехода маятника через его исходное вертикальное положение. Тормоз прикрепляется к маятнику до испытания и не влияет на показания машины в течение опыта, так как оказывает на маятник постоянное воздействие. Обе стрелки силоизмерителя устанавливаются на ноль после того, как подвешен груз тормоза.

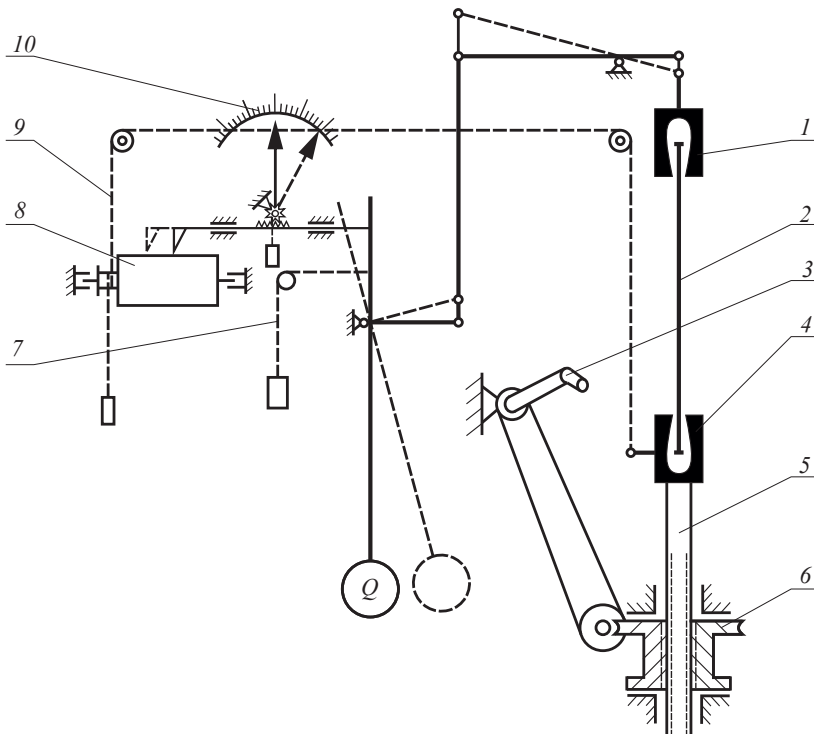


Рис. 4.4. Схема разрывной машины Р-5:

1 и 4 — захваты; 2 — образец; 3 — рукоятка; 5 — винт; 6 — гайка; 7 — тормоз маятника; 8 — диаграммный барабан; 9 — нить, поворачивающая барабан; 10 — шкала силоизмерителя

Порядок выполнения работы

1. Измерить размеры поперечного сечения образца b и h , затем вычислить его площадь A .
2. Установить образец в захваты машины.
3. Нагрузить образец начальной нагрузкой $P_0 = 5$ кН (для обжатия образца в захватах машины). Ее значение регистрировать по шкале силоизмерителя установки в единицах кгс, а затем перевести в Н.
4. С экрана многоканального прибора «Терем» переписать показания n с двух продольных тензорезисторов и двух поперечных тензорезисторов. Занести их в таблицу экспериментальных данных.
5. Плавно увеличивать нагрузку P одинаковыми ступенями ΔP до напряжения в образце, равного $(0,80 \div 0,90) \sigma_{\text{тц}}$. Одновременно на каждой стадии нагружения снимать показания электротензометра и заносить в таблицу.
6. По окончании опыта разгрузить образец до нагрузки P_0 и снять со всех тензорезисторов контрольные отсчеты, которые должны совпадать с первоначальными.
7. Рассчитать приращения показаний Δn регистрирующего прибора как разницу между последующими и предыдущими показаниями с каждого тензорезистора на ступень нагрузки ΔP .
8. Вычислить средние разности показаний $\Delta n^{\text{сп}}$ прибора с каждого тензорезистора для нескольких ступеней нагружения.
9. Вычислить средние разности $\Delta n_1^{\text{сп}}$ и $\Delta n_2^{\text{сп}}$ показаний прибора соответственно с тензорезисторов продольной и поперечной деформации.
10. Нарисовать диаграмму растяжения и провести вычисления модуля Юнга и коэффициента Пуассона по формулам (4.5), (4.6).
11. Выполнить отчет по прилагаемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки.

4. Схема и размеры образца.
5. Таблица с результатами измерений.
6. Экспериментальная диаграмма растяжения.
7. Вычисление опытных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что называется модулем упругости E , какова его размерность?
2. Каковы размерности абсолютной и относительной продольных деформаций?
3. Что называется коэффициентом Пуассона?
4. Сформулируйте и запишите закон Гука при растяжении-сжатии.
5. Для чего на образце устанавливаются по два тензометра с каждой стороны от оси сечения?

Отчет о лабораторной работе № 4
Растяжение стального образца с измерением упругих деформаций

Цель работы: _____

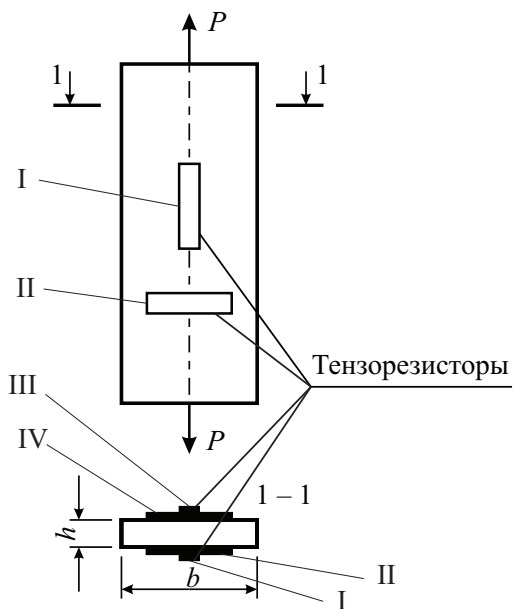
Краткое изложение теоретических основ: _____

Испытательная машина: _____

Измерительные приборы: _____

Цена деления электротензомера по деформациям $K_\epsilon =$ _____.

Схема образца с тензорезисторами



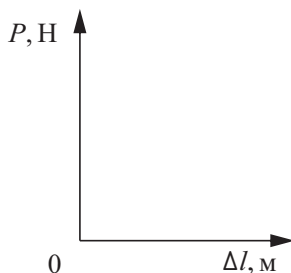
Размеры поперечного сечения образца:
 $b =$ _____ см; $h =$ _____ см; $A = bh =$ _____ см².

База тензорезистора $l =$ _____ мм.

Таблица экспериментальных данных

Нагрузка P_i , кН	Показания и приращения показаний электротензометра, в дел. шкалы прибора							
	Продольные тензорезисторы				Поперечные тензорезисторы			
	n_I	Δn_I	n_{III}	Δn_{III}	n_{II}	Δn_{II}	n_{IV}	Δn_{IV}
		 		 		 		
$\Delta P =$	$\Delta n_I^{cp} =$		$\Delta n_{III}^{cp} =$		$\Delta n_{II}^{cp} =$		$\Delta n_{IV}^{cp} =$	
	$\Delta n_1^{cp} = \frac{\Delta n_I^{cp} + \Delta n_{III}^{cp}}{2} =$				$\Delta n_2^{cp} = \frac{\Delta n_{II}^{cp} + \Delta n_{IV}^{cp}}{2} =$			

Диаграмма растяжения



Модуль Юнга

$$E = \frac{\Delta P}{A \Delta n_1^{cp} K_\epsilon} = \quad = \quad \text{МПа.}$$

Коэффициент Пуассона

$$\mu = \left| \frac{\Delta n_2^{cp}}{\Delta n_1^{cp}} \right| = \quad =$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял _____

Лабораторная работа № 5

Испытание стального круглого образца на кручение

В лабораторной работе проводится испытание стального стержня круглого поперечного сечения на кручение. Цель работы — экспериментально проверить выполнение закона Гука при кручении, а также определить модуль упругости при сдвиге и условный предел прочности при кручении стального образца.

Краткие теоретические сведения

В данной лабораторной работе используются стальные цилиндрические образцы с базой замера деформации l (рис. 5.1). На концах образца имеются головки прямоугольного поперечного сечения для закрепления в захватах испытательной машины. Это исключает проскальзывания образца в процессе нагружения.

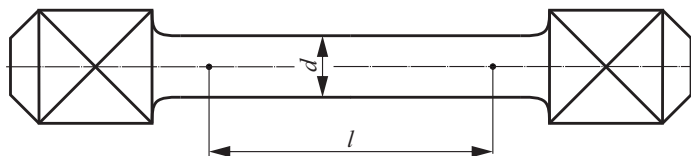


Рис. 5.1. Стальной образец цилиндрической формы

При кручении стержней круглого поперечного сечения на начальной стадии деформации происходит поворот одного поперечного сечения относительно другого на некоторый угол φ , который называется *углом закручивания*. В пределах упругих деформаций угол закручивания связан с крутящим моментом M_k линейной зависимостью в соответствии с законом Гука:

$$\varphi = \frac{M_k \cdot l}{G \cdot I_p}, \quad (5.1)$$

где l — расстояние между поперечными сечениями, на базе которого измеряется взаимный угол закручивания; I_p — полярный момент инерции поперечного сечения; G — модуль упругости при сдвиге (модуль поперечной упругости) материала образца.

Справедливость закона Гука при кручении подтверждается экспериментально построенной диаграммой (рис. 5.2), на которой наблюдается прямолинейный участок для упругих деформаций. Диаграмма строится по результатам измерений величин крутящего момента M_k и соответствующих углов закручивания φ .

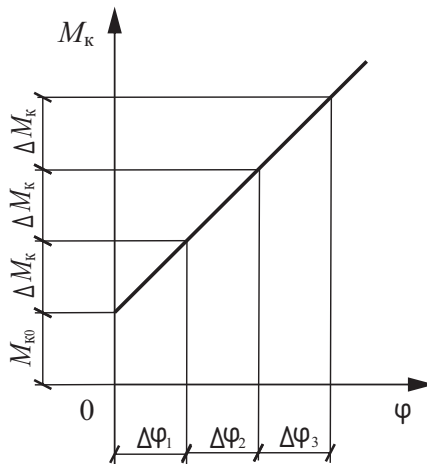


Рис. 5.2. Диаграмма кручения в пределах упругих деформаций

В ходе эксперимента по кручению можно определить значение модуля поперечной упругости G материала образца. Основываясь на формуле (5.1), получим

$$G = \frac{\Delta M_k \cdot l}{\Delta \varphi_{\text{ср}} \cdot I_p}, \quad (5.2)$$

где ΔM_k — приращение крутящего момента на одну ступень нагружения; $\Delta \varphi_{\text{ср}}$ — среднеарифметическое значение угла закручивания на ступень нагружения.

Условный предел прочности круглого стержня при кручении определяется по формуле

$$\tau_{\text{пч}} = \frac{M_{\text{к, разр}}}{W_p}, \quad (5.3)$$

где $M_{к, разр}$ — крутящий момент, при котором происходит разрушение образца; W_p — полярный момент сопротивления поперечного сечения образца.

Необходимо отметить, что вычисляемый по формуле (5.3) предел прочности $\tau_{пч}$ будет условным, поскольку данная формула предполагает действие закона Гука, который не выполняется при разрушении образца.

Описание лабораторной установки

Испытание стального стержня круглого поперечного сечения на кручение производится на испытательной машине КМ-50-1. Эта машина с максимальным крутящим моментом 500 Н·м (50 кгс·м) предназначена для проведения различных испытаний на кручение. Общий вид испытательной машины и индикаторное устройство, которое крепится непосредственно на образец, представлены на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Испытательная машина КМ-50-1: общий вид и индикаторное устройство

Схематическое устройство машины показано на рис. 5.4. Она состоит из следующих основных узлов: корпуса, механического и ручного привода, механизма нагружения, электродвигателя, силоизмерительного механизма, захватов, индикаторного устройства.

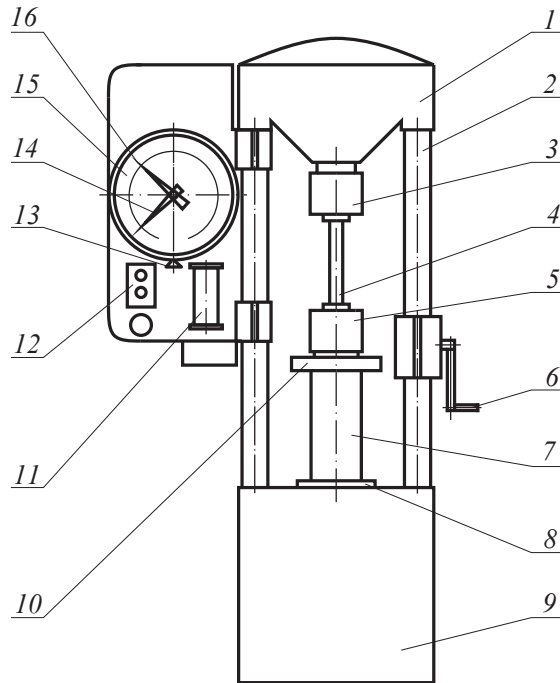


Рис. 5.4. Схема испытательной машины КМ-50-1:

1, 9 — верхняя и нижняя части корпуса; 2 — связывающие колонны; 3, 5 — верхний и нижний захваты для крепления образца; 4 — образец для испытаний; 6 — рукоятка ручного привода; 7 — нагрывающий винт; 8 — лимб; 10 — маховик; 11 — записывающее устройство; 12 — кнопочное устройство; 13 — регулировочный винт; 14, 15, 16 — шкала и стрелки силоизмерительного устройства

Корпус состоит из верхней 1 и нижней 9 частей, а также связывающей колонны 2. В нижней части корпуса машины заключены механический и ручной приводы для нагружения образца. Ручной привод приводится в работу рукояткой 6, а механический — кнопочным устройством 12. Для закрепления образца применяют захваты 3 и 5. Верхний захват 3 неподвижный. Нижний захват 5 подвижный, его положение регулируется маховиком 10. Маховик 10 вращает нагрывающий винт 7. Силовой измерительный механизм, который обеспечивает регистрацию величины крутящего момента, состоит из шкалы 15 и регулировочного винта 13, а также стрелок 14 и 16. Лимб 8 — шкала для измерения углов закручивания поперечных сечений образца.

Для точного измерения взаимного угла поворота двух поперечных сечений образца в пределах упругих деформаций применяется индикаторное устройство, представленное на рис. 5.5.

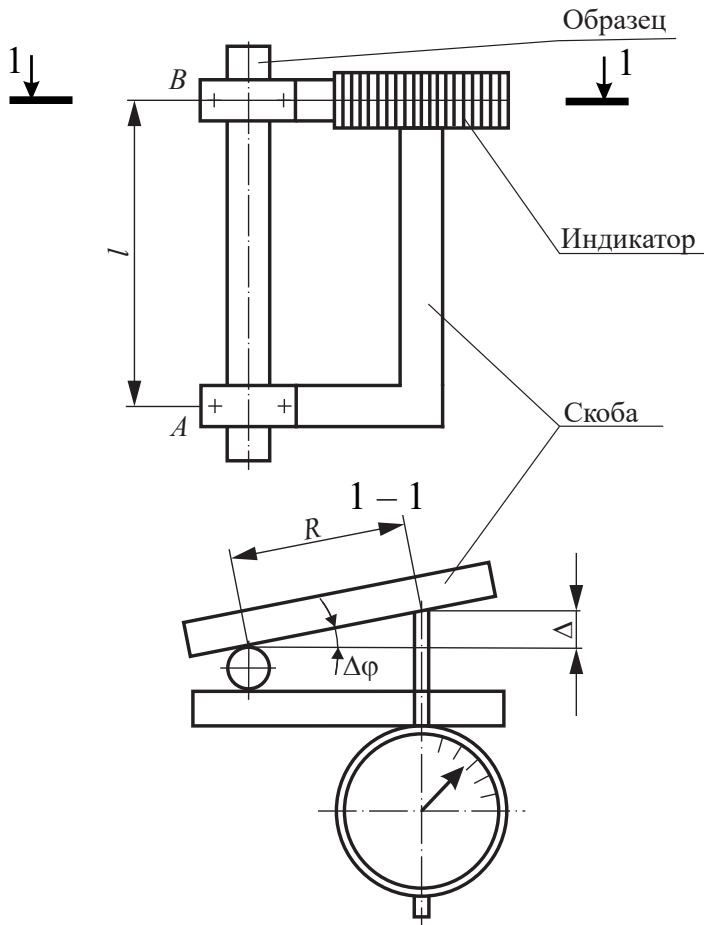


Рис. 5.5. Схема индикаторного устройства испытательной машины КМ-50-1

В сечении *A* исследуемого образца закрепляется скоба, служащая упором для ножки индикатора. В сечении *B*, находящемся на расстоянии *l* (база замера деформации) от сечения *A*, закрепляется рычаг, на конце которого укреплен стрелочный индикатор. Взаимный угол поворота сечения *A* относительно сечения *B* определяется по формуле

$$\operatorname{tg}(\Delta\varphi) \approx \Delta\varphi = \frac{\Delta}{R} = \frac{\Delta n \cdot K}{R},$$

где Δn — приращение показаний стрелочного индикатора в делениях; R — плечо упорного рычага, т. е. расстояние от оси образца до упора ножки индикатора, мм; K — цена деления шкалы индикатора.

Порядок выполнения работы

1. Измерить диаметр d подвергающегося испытанию стального образца круглого поперечного сечения штангенциркулем с точностью до 0,1 мм; замер провести в двух взаимно перпендикулярных поперечных направлениях, в расчет принять среднеарифметическое значение. По результатам произведенного обмера вычислить полярный момент инерции и полярный момент сопротивления поперечного сечения образца.
2. Закрепить на образце индикаторное устройство, как показано на схеме рис. 5.5.
3. Вставить образец 4 с индикаторным устройством в захваты 3 и 5 испытательной машины (рис. 5.4).
4. Уточнить настройку шкалы 15, воспользовавшись регулировочным винтом 13.
5. Для проверки закона Гука образец с помощью ручного привода 6 необходимо нагрузить начальным скручивающим моментом, равным крутящему моменту $M_{к0} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, для исключения погрешности, которая может возникать из-за возможных люфтов в захватах.
6. Произвести ручным приводом 6 последовательно нагружение образца одинаковыми ступенями, равными изменению крутящего момента $\Delta M_k = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, и регистрировать соответствующие показания индикаторного устройства. При проверке закона Гука нагружать образец следует до крутящего момента $M_k \leq 35 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Этому моменту соответствуют максимальные касательные напряжения около 100 МПа.
7. Занести результаты испытаний в таблицу экспериментальных данных.
8. Рассчитать приращение показаний Δl стрелочного индикатора и приращение $\Delta \varphi$ углов закручивания на ступень нагрузки.
9. Изобразить полученные результаты на диаграмме кручения, представленной на рис. 5.2. Экспериментальные точки 1, 2, 3, ... на диаграмме будут располагаться приблизительно на одной прямой. Погрешность может быть связана с тем, что экспериментально определенные приращения углов закручивания $\Delta \varphi_i$ могут незначительно отличаться друг от друга. Прямая линия на диаграмме кручения характеризует линейную зависи-

- мость между крутящим моментом и углом закручивания, что подтверждает закон Гука при кручении.
10. После подтверждения экспериментальным образом закона Гука снять с образца индикаторное устройство.
 11. Настроить контрольную стрелку *16* силоизмерителя (рис. 5.4), зацепив ее с рабочей стрелкой *14*.
 12. Произвести настройку лимба δ (рис. 5.4) для замера угла закручивания.
 13. Включить электродвигатель, нажав кнопку «пуск» на устройстве *12*, запустив механический привод, до разрушения образца.
 14. Выключить электродвигатель кнопочным устройством *12* после разрушения образца, нажав кнопку «стоп». Записать значение крутящего момента $M_{к, разр}$ при котором произошло разрушение образца.
 15. По формуле (5.2) вычислить модуль упругости при сдвиге G , а по формуле (5.3) — условный предел прочности $\tau_{пч}$.
 16. Результаты и выводы оформить в отчете.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки.
4. Схема и размеры образца.
5. Таблица с результатами измерений.
6. Экспериментальная диаграмма кручения.
7. Определение значений модуля упругости при сдвиге и условного предела прочности при кручении.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Каким образом в лабораторной работе происходит проверка закона Гука при кручении стального образца круглого поперечного сечения?
2. Напишите формулы для расчета модуля поперечной упругости материала, предела прочности при кручении, полярного

момента инерции и полярного момента сопротивления круглого поперечного сечения.

3. Действует ли закон Гука при разрушении образца?
4. Каковы характеристики образца и особенности его закрепления в испытательной машине?
5. Как в работе определяется взаимный угол поворота?

Отчет о лабораторной работе № 5 Испытание стального круглого образца на кручение

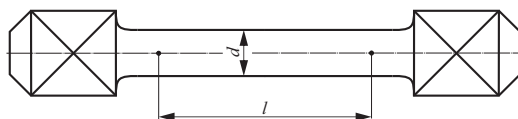
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

1. Испытательная машина: _____
2. Измерительные приборы: _____

Плечо рычага, служащего упором ножки индикатора $R = 62$ мм.
Цена деления шкалы индикатора $K =$ мм/дел.

Схема и размеры образца



База измерения $l = 100$ мм;

$$d = \quad \text{мм} = \quad \text{м};$$

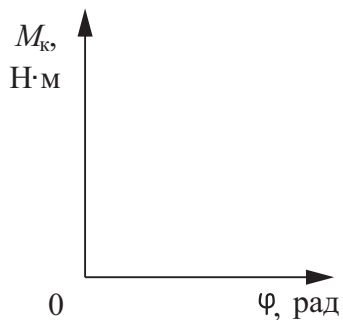
$$W_p \approx 0,2d^3 = \quad \text{см}^3 = \quad \text{м}^3;$$

$$I_p \approx 0,1d^4 = \quad \text{см}^4 = \quad \text{м}^4.$$

Таблица экспериментальных данных

Крутящий момент M_{ki} , Н·м	Показания индикатора n_i , в дел. шкалы прибора	Приращение показаний индикатора $\Delta n_i = n_i - n_{i-1}$, в дел. шкалы прибора	Приращение угла закручивания $\Delta \varphi_i = \frac{\Delta n_i \cdot K}{R}$, рад
ΔM_k — приращение крутящего момента на одну ступень нагрузки, равную 5 Н·м			$\Delta \varphi_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i}{n} =$

Экспериментальная диаграмма кручения



Значение модуля упругости при сдвиге

$$G = \frac{\Delta M_k \cdot l}{\Delta \varphi_{\text{ср}} \cdot I_p} = \quad = \quad \text{МПа.}$$

Момент, при котором происходит разрушение образца:

$$M_{\text{к, разр}} = \quad \text{Н·м.}$$

Условный предел прочности при кручении

$$\tau_{\text{пч}} = \frac{M_{\text{к, разр}}}{W_p} = \quad = \quad \text{МПа.}$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 6

Проверка линейного закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при чистом изгибе

В лабораторной работе выполняется испытание двутавровой балки, расположенной на двух опорах, на чистый изгиб. Цель работы — экспериментальным путем проверить линейный закон распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при чистом изгибе.

Краткие теоретические сведения

Изгиб — вид деформации, при котором происходит искривление оси прямого стержня или изменение кривизны оси кривого стержня. Стержень, испытывающий изгиб, называется *балкой*. Испытания на изгиб часто используются для оценки механических свойств хрупких или малопластичных материалов при воздействии коррозионной среды, а также для оценки пластичности и качества сварных соединений. Испытание на изгиб воспроизводит характерные для многих конструктивных элементов условия механического нагружения и позволяет изучать свойства поверхностных слоев, наиболее напряженных при разрушении.

Изгиб называют *чистым*, если изгибающий момент M является единственным внутренним усилием, возникающим в поперечном сечении балки. Если в поперечном сечении наряду с изгибающим моментом M возникает также силовой фактор в виде поперечной силы Q , то изгиб называется *поперечным*. Когда изгибающий момент в поперечном сечении балки действует в плоскости, проходящей через одну из главных центральных осей инерции этого сечения, изгиб называется *прямым*.

В данной лабораторной работе испытание на чистый изгиб проводят на двутавровой балке, опирающейся на две шарнирные опоры

(рис. 6.1). Поместим начало координат в центр тяжести поперечного сечения, тогда координатные оси y и z , как оси симметрии, будут главными центральными осями. Продольная ось балки совпадает с осью x .

Подействуем на балку двумя сосредоточенными силами, линии действия которых проходят через точки, находящиеся на расстоянии a от левой и правой опор балки. Поскольку силы перпендикулярны оси x и лежат в плоскости xu , которая является главной центральной плоскостью, балка будет изгибаться в этой плоскости. Такой изгиб называют *плоским изгибом*.

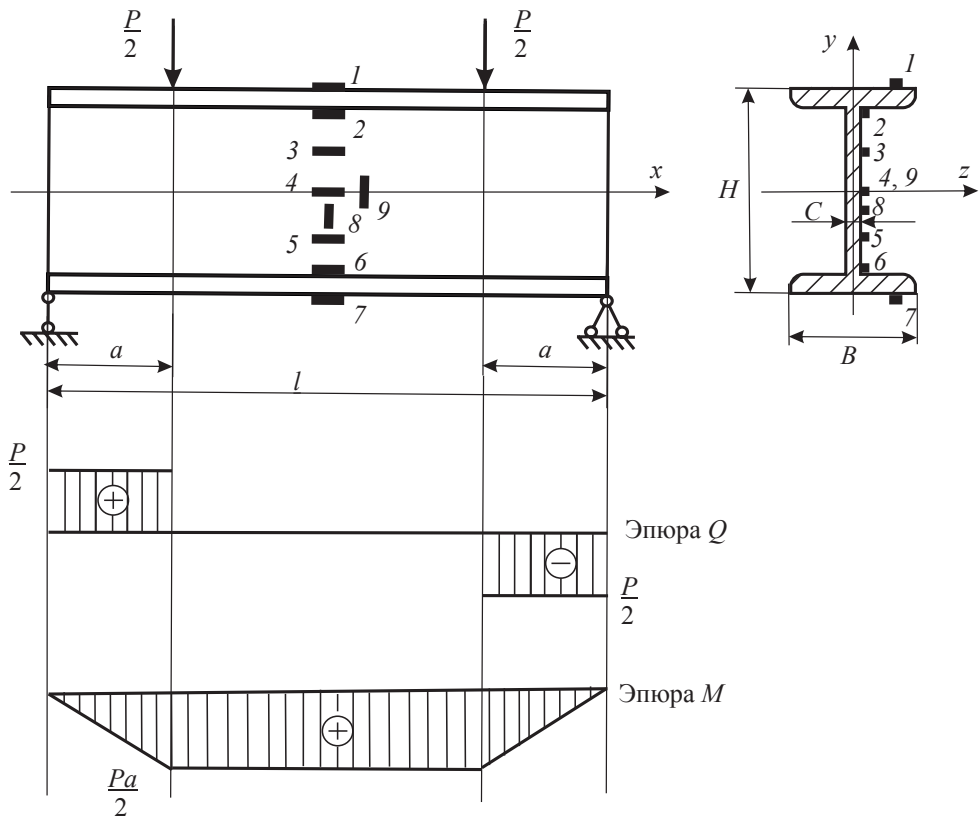


Рис. 6.1. Двутавровая балка, нагруженная двумя сосредоточенными силами

Около опор балки наблюдается прямой поперечный изгиб, а в ее поперечных сечениях возникают нормальные и касательные напряжения. Нормальные напряжения связаны с изгибающим моментом, а касательные напряжения — с поперечной силой.

В средней части балки реализуется чистый изгиб, значит, касательные напряжения равны нулю. Нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения балки рассчитываются по формуле

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} y, \quad (6.1)$$

где M_z — изгибающий момент в рассматриваемом сечении относительно *нейтральной оси* z (линия в поперечном сечении балки, в точках которой нормальные напряжения равны нулю); I_z — момент инерции сечения относительно оси z ; y — расстояние от оси z до точки, в которой вычисляют напряжение. Знак напряжения σ_x определяют по характеру деформации продольных волокон балки; для зоны растяжения берется знак «+», а для зоны сжатия знак «-».

При выводе формулы (6.1) приняты следующие гипотезы:

а) плоских сечений;

б) отсутствия боковых давлений ($\sigma_y = 0$).

При чистом изгибе напряжения σ_x , найденные по формуле (6.1), в растянутой области балки являются главными напряжениями σ_1 , а в сжатой — σ_3 . Площадки, на которых они действуют, называют *главными площадками*. Они будут совпадать с поперечным сечением балки.

Из формулы (6.1) видно, что для любого поперечного сечения балки нормальные напряжения по высоте сечения изменяются по линейному закону и достигают максимальной величины в точках, наиболее удаленных от *нейтрального слоя* (слой, образованный продольными волокнами, длина которых не изменяется при изгибе):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{I_z} y_{\max},$$

где y_{\max} — расстояние от наиболее удаленной точки до нейтрального слоя.

Двутавровое сечение симметрично относительно оси z (рис. 6.1), поэтому наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения одинаковы по величине и рассчитываются по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{W_z}, \quad (6.2)$$

где W_z — осевой момент сопротивления сечения при изгибе.

Чтобы экспериментально проверить линейный закон изменения нормальных напряжений, по высоте сечения балки в зоне чистого изгиба, в девяти точках сечения, наклеены тензорезисторы (рис. 6.1). Тензорезисторы 1 и 7 наклеены на полках двутавра, остальные — на его стенке. Тензорезисторы 2, 3, 5, 6 наклеены параллельно продольной оси балки на определенных расстояниях от нее; тензорезисторы 4 и 9 наклеены на оси x , причем тензорезистор 4 параллелен этой оси, а тензорезистор 9 перпендикулярен ей.

С помощью электротензометрического метода определяют относительную продольную деформацию ε_x около этих тензорезисторов, т. е. на разных расстояниях от нейтральной оси z .

Затем находят нормальные напряжения по формуле

$$\sigma_x = E \varepsilon_x, \quad (6.3)$$

где E — модуль продольной упругости (модуль Юнга) материала балки.

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на учебном универсальном комплексе СМ-1, внешний вид которого показан на рис. 6.2, а схема — на рис. 6.3. Комплекс состоит из стола, соответствующей наладки 3, измерителя деформации (ИД) 1 тензометрического цифрового ИДТЦ-01 (прил. 1) и блока измерения усилий (БИУ) 2 (прил. 2). Стол имеет каркас 7, встроенную установочную плиту 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления наладки 3, набор выдвижных ящиков 5 для хранения элементов наладки, колеса 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четыре опоры 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

Используемая в данной лабораторной работе наладка показана на рис. 6.4. Она включает образец 5, представляющий собой двутавровую балку, расположенную на опорах 6 и 11, которые закреплены болтовыми соединениями на плите стола 7. Винтовой пресс 3, установленный на плите стола 7, закреплен двумя болтовыми соединениями (соединение состоит из болта 8, гайки 9 и шайбы 10). На балке установлена прижимная планка 4 с закрепленным на ней датчиком уси-

лий 13 до 5 кН. Планка 4 служит для нагружения образца 5 нагружающим винтом 2 пресса 3 при помощи штурвала 1. В середине пролета двутавровой балки (участок чистого изгиба) наклеены девять тензоре- зисторов 12, как показано на рис. 6.1, для измерения относительных продольных деформаций электротензометрическим методом.



Рис. 6.2. Вид комплекса СМ-1 для испытания балки на чистый изгиб

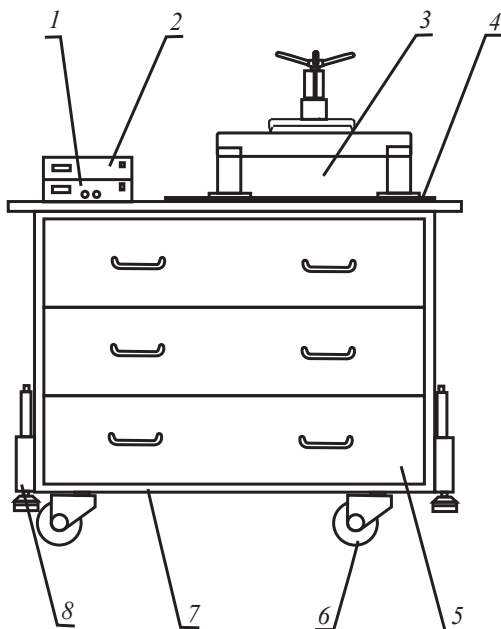


Рис. 6.3. Схема комплекса СМ-1 для испытания балки на чистый изгиб:
1 – ИД; 2 – БИУ; 3 – наладка; 4 – установочная плита; 5 – ящики; 6 – колеса;
7 – каркас стола; 8 – опоры

Технические характеристики изучаемой двутавровой балки:

длина рабочей части, мм.....	750±2
высота, мм.....	80±1
ширина полки, мм.....	32±1
толщина полки и стенки, мм.....	2±0,2
нагружающая сила, кН, не более.....	3
материал.....	сплав Д16Т

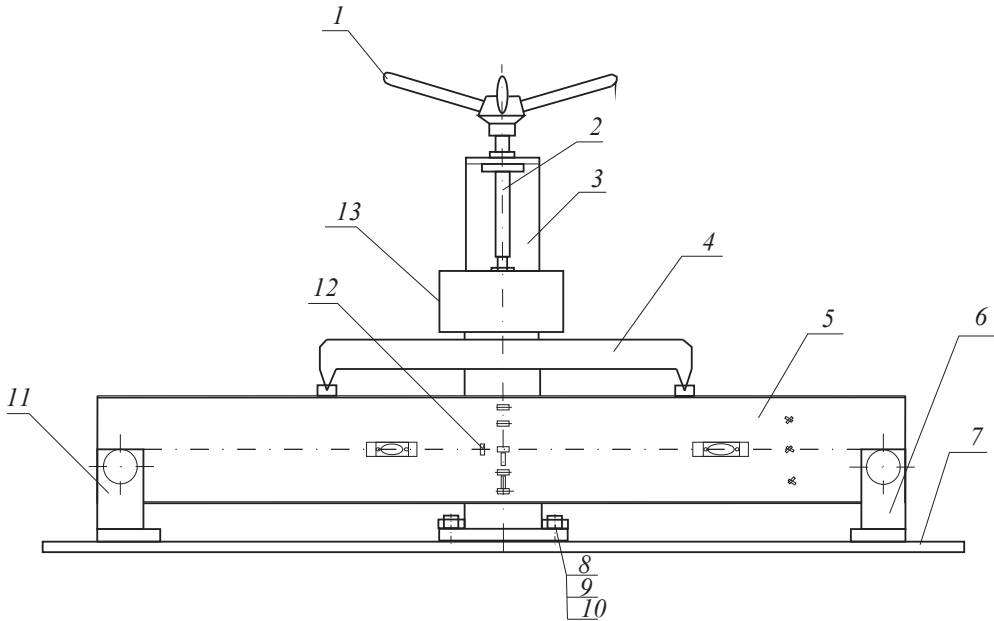


Рис. 6.4. Наладка:

1 — штурвал; 2 — нагружающий винт; 3 — пресс винтовой; 4 — прижимная планка;
 5 — двутавровая балка; 6, 11 — опоры; 7 — плита стола; 8 — болт; 9 — гайка; 10 — шайба;
 12 — тензорезисторы; 13 — датчик усилий до 5 кН

Порядок выполнения работы

1. Собрать наладку, как показано на рис. 6.3, подключив к балке 5 (рис. 6.4) ИД и БИУ.
2. Произвести измерения расстояния от левой и правой опор балки до точек соприкосновения прижимной планки с двутавро-

вой балкой, расстояния между тензорезисторами и рассчитать момент инерции поперечного сечения относительно его нейтральной оси.

3. Нагрузить балку начальной силой $P_1 = 0,5$ кН, значение которой контролировать по показаниям БИУ.
4. Снять показания ИД n_i со всех девяти тензорезисторов, наклеенных в зоне чистого изгиба, выбирая переключателем «Канал» необходимый тензорезистор. Занести результаты измерений в таблицу экспериментальных данных.
5. Нагрузить балку последовательно силами 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 кН. При каждом нагружения снять показания ИД со всех тензорезисторов и занести их в таблицу данных.
6. Убрать нагрузку.
7. Вычислить среднюю разность Δn_i^{cp} показаний ИД для i -го тензорезистора на ступень нагрузки $\Delta P = 0,5$ кН.
8. Вычислить относительную продольную деформацию ε_i около каждого тензорезистора по формуле

$$\varepsilon_i = K_\varepsilon \Delta n_i^{\text{cp}}, \quad (6.4)$$

где K_ε — единица дискретности ИД при измерении деформации.

9. Найти экспериментальные значения нормальных напряжений в плоскости поперечного сечения зоны чистого изгиба в девяти точках (места расположения тензорезисторов) с помощью формулы (6.3).
10. Вычислить максимальные теоретические значения растягивающего и сжимающего напряжений в зоне чистого изгиба по формуле (6.2).
11. Построить эпюру теоретических нормальных напряжений по высоте сечения зоны чистого изгиба. Отметить на ней точками значения экспериментальных напряжений в местах наклейки тензорезисторов.
12. Сравнить теоретические и экспериментальные значения напряжений и сделать заключение о справедливости закона распределения нормальных напряжений по поперечному сечению изгибаемого стержня.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Таблица с экспериментальными данными.
5. Вычисления относительных деформаций и нормальных напряжений для точек зоны чистого изгиба.
6. Эпюра теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба с отмеченными значениями экспериментально полученных напряжений.
7. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какой изгиб называется прямым?
2. В чем заключается разница между чистым и поперечным изгибом?
3. Какие напряжения возникают в поперечном сечении балки при чистом изгибе?
4. Как экспериментально определяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки?
5. Как доказать, что при изгибе нормальные напряжения по высоте сечения меняются по линейному закону?

Отчет о лабораторной работе № 6

Проверка линейного закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при чистом изгибе

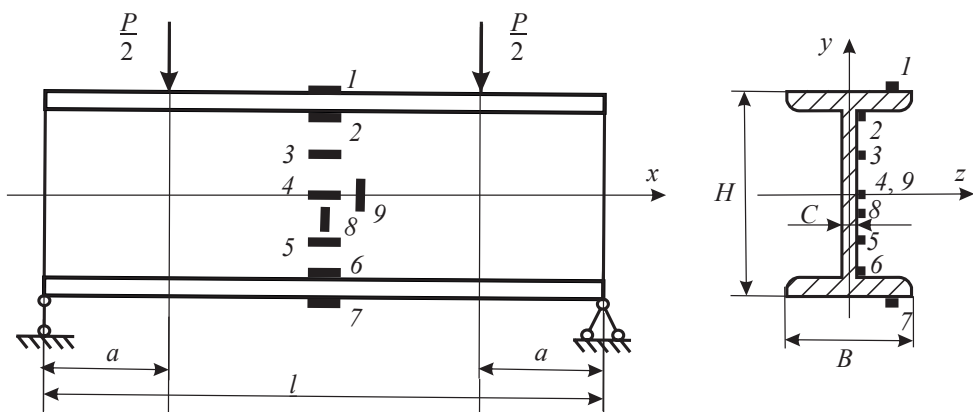
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Единица дискретности ИД при измерениях деформации $K_\varepsilon =$ _____ ,
 модуль Юнга $E =$ _____ ГПа.

Расчетная схема балки и схема расположения тензорезисторов



$$l = \quad \text{м}; a = \quad \text{м};$$

$$H = \quad \text{м}; B = \quad \text{м}; C = \quad \text{м};$$

$$I_z = \frac{BH^3 - (B - C)(H - 2C)^3}{12} = \quad = \quad \text{м}^4; y_{\max} = \quad \text{м};$$

расстояние между тензорезисторами _____ мм.

Таблица экспериментальных данных

j	Нагрузка P_j , кН	Показания ИД n_i для i -го тензорезистора, в ед. шкалы прибора								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Средняя разность Δn_i^{cp} показаний ИД на i -м тензорезисторе для ступени нагрузки $\Delta P = 0,5$ кН

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=2}^6 (n_i^j - n_i^{j-1})}{5},$$

где n_i^j — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении; $i = 1, 2, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 6$.

$$\Delta n_1^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_2^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_3^{\text{cp}} = \quad,$$

$$\Delta n_4^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_5^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_6^{\text{cp}} = \quad,$$

$$\Delta n_7^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_8^{\text{cp}} = \quad, \Delta n_9^{\text{cp}} = \quad.$$

Относительная продольная деформация ε_i около i -го тензорезистора

$$\varepsilon_i = K_\varepsilon \Delta n_i^{\text{cp}}.$$

$$\varepsilon_1 = \quad, \varepsilon_2 = \quad, \varepsilon_3 = \quad,$$

$$\varepsilon_4 = \quad, \varepsilon_5 = \quad, \varepsilon_6 = \quad,$$

$$\varepsilon_7 = \quad, \varepsilon_8 = \quad, \varepsilon_9 = \quad.$$

Нормальное напряжение σ_i в i -ой точке зоны чистого изгиба балки

$$\sigma_i = E \varepsilon_i.$$

$$\sigma_1 = \quad \text{МПа}, \sigma_2 = \quad \text{МПа}, \sigma_3 = \quad \text{МПа},$$

$$\sigma_4 = \quad \text{МПа}, \sigma_5 = \quad \text{МПа}, \sigma_6 = \quad \text{МПа},$$

$$\sigma_7 = \quad \text{МПа}, \sigma_8 = \quad \text{МПа}, \sigma_9 = \quad \text{МПа}.$$

Максимальные теоретические значения растягивающего и сжимающего напряжений в зоне чистого изгиба балки

$$\max \sigma = \pm \frac{M_z}{W_z},$$

где M_z — изгибающий момент, W_z — осевой момент сопротивления сечения.

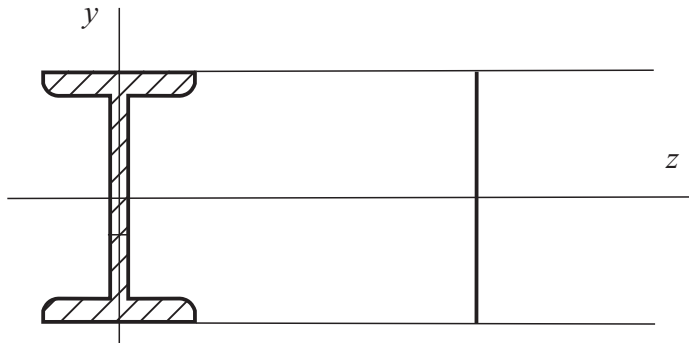
$$M_z = \frac{\Delta P}{2} a = \quad \text{Н}\cdot\text{м};$$

$$W_z = \frac{I_z}{y_{\max}} = \quad \text{м}^3.$$

$$\max \sigma_p = + \frac{M_z}{W_z} = \quad = \quad \text{Па};$$

$$\max \sigma_c = - \frac{M_z}{W_z} = \quad = \quad \text{Па}.$$

Эпюра теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба



Выводы по работе: _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 7

Определение напряжений в балке при прямом поперечном изгибе

В данной работе рассматривается прямой поперечный изгиб двутавровой стальной балки на двух опорах, нагруженной сосредоточенной силой.

Цель работы — экспериментально определить нормальные и главные напряжения в различных точках поперечного сечения двутавровой балки при прямом поперечном изгибе и сравнить их с расчетными значениями.

Краткие теоретические сведения

При прямом поперечном изгибе балки в ее поперечных сечениях возникают внутренние усилия: поперечная сила Q и изгибающий момент M , а плоскость действия изгибающего момента проходит через одну из главных центральных осей поперечного сечения.

Поперечная сила Q в сечении балки численно равна алгебраической сумме проекций внешних сил, действующих по одну сторону от сечения, на нормаль к оси балки. Поперечная сила считается положительной, если равнодействующая всех внешних сил слева от сечения направлена вверх, а справа — вниз.

Изгибающий момент M в поперечном сечении балки численно равен алгебраической сумме моментов внешних сил, действующих по одну сторону от сечения относительно центра тяжести рассматриваемого сечения. Изгибающий момент считается положительным, если равнодействующий момент внешних сил слева от сечения направлен по часовой стрелке, а справа — против часовой стрелки. Можно использовать другое правило: изгибающий момент считается положительным, если происходит растяжение нижних волокон, и отрицательным, если происходит сжатие нижних волокон.

При поиске опасного сечения, в котором одновременно велики значения поперечной силы Q и изгибающего момента M , строят эпюры этих внутренних силовых факторов. Эпюра изгибающих моментов может строиться со стороны *растянутых волокон*, тогда положительные ординаты откладываются вниз от оси эпюры, а отрицательные — вверх (ось эпюры должна быть направлена параллельно оси балки).

В поперечных сечениях балки возникают *нормальные* σ и *касательные* τ напряжения, которые связаны с изгибающим моментом M и поперечной силой Q соответственно. Опасные точки в сечении расположены там, где максимальны значения нормальных σ и касательных τ напряжений.

Из теории плоского напряженного состояния следует, что для изучаемого напряженного состояния *главные напряжения*, которые принимают экстремальные значения и действуют на главных площадках, вычисляются по формуле

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (7.1)$$

Угол наклона α_0 главных площадок определяется по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2\tau}{\sigma}.$$

Угол α_0 должен лежать в пределах от -45° до $+45^\circ$, он считается положительным, если отложен против часовой стрелки от положительного направления оси продольной балки (оси x).

В данной лабораторной работе определяются напряжения, распределенные по поперечному сечению двутавровой стальной балки, края которой закреплены на шарнирных опорах (рис. 7.1). Балка нагружена вертикальной сосредоточенной силой P , направленной вверх. Ее точка приложения находится в середине балки.

В произвольной точке заданного поперечного сечения балки нормальные напряжения вычисляются по формуле

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} y, \quad (7.2)$$

где M_z — изгибающий момент в рассматриваемом сечении относительно нейтральной оси z ; I_z — момент инерции сечения относительно оси z ; y — расстояние от оси z до точки, в которой определяется напряжение.

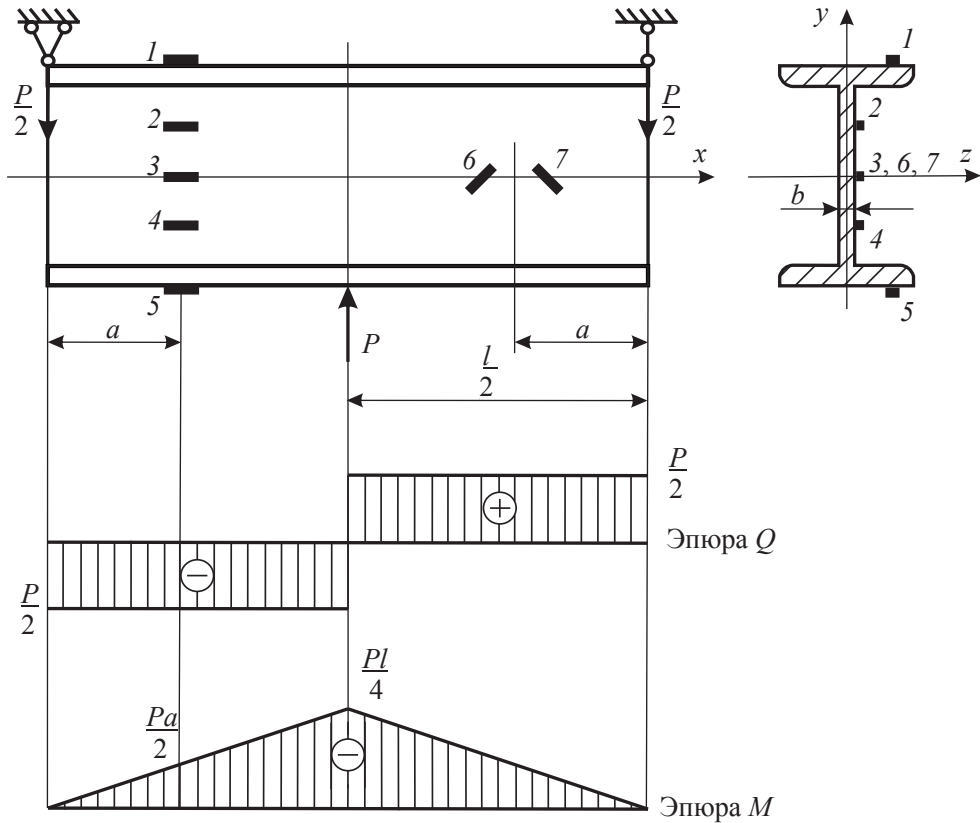


Рис. 7.1. Двухтавовая балка, нагруженная сосредоточенной силой

Знак нормальных напряжений определяется характером деформации продольных волокон балки: в зоне растянутых волокон напряжение имеет положительное значение, в зоне сжатых волокон — отрицательное.

Согласно формуле (7.2) нормальные напряжения по высоте поперечного сечения изменяются по линейному закону и достигают максимальных значений по мере удаленности от нейтральной оси сечения.

Касательные напряжения в произвольной точке поперечного сечения балки вычисляются по формуле Журавского

$$\tau_{xy} = \tau = \frac{Q_y S_z^{\text{отс}}}{I_z b}, \quad (7.3)$$

где Q_y — поперечная сила, возникающая в сечении; $S_z^{\text{отс}}$ — статический момент отсеченной части сечения относительно главной цен-

тральной оси z , расположенной выше или ниже уровня, на котором определяется касательное напряжение, при условии, что центр тяжести сечения балки не находится в отсеченной части сечения; b — ширина сечения на уровне, где определяется касательное напряжение.

Касательные напряжения τ считаются положительными, если они стремятся повернуть рассматриваемый элемент балки по часовой стрелке. Из выражения (7.3) следует, что касательные напряжения достигают максимального значения в точках поперечного сечения, лежащих на нейтральной оси z , где нормальные напряжения равны нулю ($\sigma_x = 0$).

В точках поперечного сечения, расположенных на нейтральной оси z , главные напряжения, согласно выражениям (7.1) и (7.3), определяются по формуле

$$\sigma_{\max, \min} = \pm \tau = \pm \frac{Q_y (S_z^{\text{отс}})_{\max}}{I_z b}, \quad (7.4)$$

где $(S_z^{\text{отс}})_{\max}$ — статический момент полусечения двутавра относительно главной центральной оси z .

Главные напряжения в нейтральном слое действуют на площадках, расположенных под углом 45° к оси x .

Для экспериментального подтверждения линейного закона изменения нормальных напряжений по высоте сечения балки на расстоянии a от левой опоры наклеены пять тензорезисторов под номерами от 1 до 5 (рис. 7.1). На таком же расстоянии a от правой опоры наклеены два тензорезистора под номерами 6 и 7 для экспериментального определения значений главных напряжений. Тензорезисторы 1 и 5 наклеены на полках двутавра, а тензорезисторы 2 и 4 — на стенке двутавра параллельно оси x на расстоянии $y_2 = y_4$ от нее. Тензорезисторы 3, 6 и 7 наклеены на самой продольной оси балки, причем тензорезистор 3 параллелен ей, а тензорезисторы 6 и 7 расположены под углом 45° к ней.

Используя электротензометрический метод, находят нормальные напряжение в точках 1, 2, 3, 4 и 5, значения которых определяются по закону Гука для линейного напряженного состояния:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i = \Delta n_i K_\sigma, \quad (7.5)$$

где ε_i — продольная относительная деформация около i -й точки сечения; E — модуль Юнга; Δn_i — приращение показания регистрирующе-

го прибора для i -й точки сечения на ступень нагрузки; K_σ — цена деления шкалы (единица дискретности) прибора по напряжениям, МПа.

В нейтральном слое балки наблюдается *чистый сдвиг*, там отсутствуют нормальные напряжения. Направления касательных напряжений и главных напряжений в окрестности тензорезисторов 6 и 7 показаны на рис. 7.2.

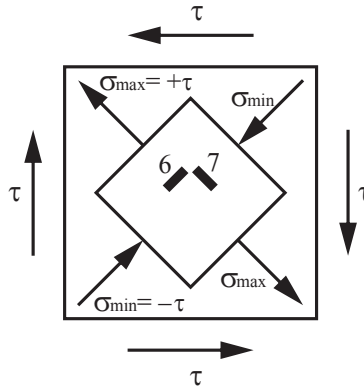


Рис. 7.2. Определение главных напряжений при поперечном изгибе

Согласно теории плоского напряженного состояния, главные напряжения в точках 6 и 7 определяются по формулам

$$\sigma_{\max} = \sigma_6 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_6 + \mu\varepsilon_7) = \frac{(\Delta n_6 + \mu\Delta n_7)K_\sigma}{1-\mu^2}, \quad (7.6)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_7 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_7 + \mu\varepsilon_6) = \frac{(\Delta n_7 + \mu\Delta n_6)K_\sigma}{1-\mu^2},$$

где E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона материала балки.

Описание лабораторной установки

Экспериментальное определение напряжений для подтверждения теоретических формул (7.2) и (7.4) осуществляется на лабораторной установке, общий вид которой представлен на рис. 7.3. Установка (рис. 7.4) представляет собой лабораторный стол 8 с установленным на нем П-образным каркасом 7, на котором расположен гидравлический домкрат 3. На концах каркаса закреплена на двух опорах дву-

тавовая балка 2. На столе находится измеритель деформации (ИД) 6 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (прил. 1). Домкрат служит для нагружения образца силой, которая прикладывается снизу в середине пролета балки. Ее величину регистрируют с помощью манометра 4. По высоте двутавра наклеены пять тензорезисторов 1 для определения относительной деформации при воздействии нагрузки электро-тензометрическим методом. Два тензорезистора 5 наклеены на нейтральном слое балки и расположены под углом 45° к нему (см. рис. 7.1).

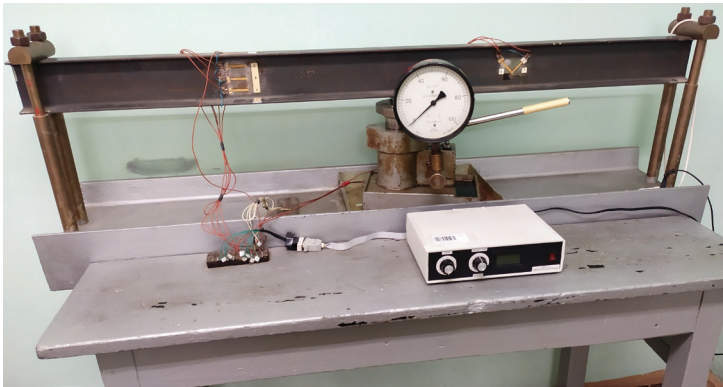


Рис. 7.3. Общий вид лабораторной установки

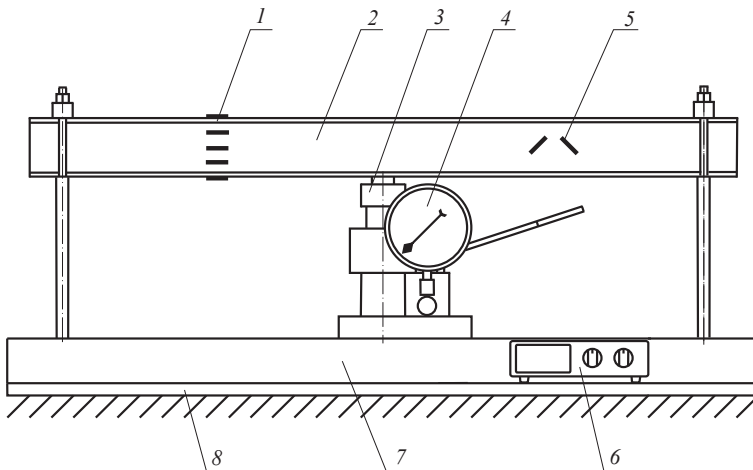


Рис. 7.4. Схема лабораторной установки:

1 — тензорезисторы 1–5, наклеенные по высоте балки на равных расстояниях; 2 — двутавровая балка, опирающаяся на две опоры; 3 — гидравлический домкрат; 4 — манометр; 5 — тензорезисторы 6 и 7, наклеенные под углом 45° к оси балки; 6 — ИД; 7 — П-образный каркас; 8 — столешница лабораторного стола

Порядок выполнения работы

1. Произвести измерение длины балки, расстояния от опор до точек сечения, в которых приклеены тензорезисторы, и расстояния между тензорезисторами в сечении.
2. Из таблицы сортамента по номеру 10 двутаврового поперечного сечения исследуемой балки выписать значения толщины стенки сечения, а также момента инерции, момента сопротивления, статического момента полусечения относительно нейтральной оси сечения.
3. При нагрузке $P_0 = 0$ снять начальные показания ИД n_i^0 с тензорезисторов $i = 1, 2, 3, \dots, 7$, выбирая переключателем «Канал» необходимый тензорезистор. Результаты измерений занести в таблицу экспериментальных данных.
4. Произвести последовательно нагружение балки 2 (рис. 7.4) двумя равными ступенями ΔP с помощью домкрата 3 силами P_j , где $j = 1, 2$. Силовое воздействие на балку найти по манометру 4, который измеряет техническую атмосферу в кгс/см². Для получения значения действующей на балку 2 силы P_j необходимо умножить показания манометра p_j на коэффициент K_M :

$$P_j = p_j K_M,$$

$$\text{где } [K_M] = \frac{\text{Н}}{\text{кгс} / \text{см}^2}.$$

При этом должно соблюдаться условие

$$P_{\max} \leq \frac{\sigma_{\text{пл}} W_z}{c},$$

где $\sigma_{\text{пл}}$ — предел пропорциональности материала двутавровой балки для малоуглеродистой стали $\sigma_{\text{пл}} = 200$ МПа; W_z — осевой момент сопротивления поперечного сечения двутавровой балки; $c = \frac{l}{4}$ и $a = \frac{l}{2}$ (см. рис. 7.1). Для каждой ступени нагружения снять показания с ИД n_i^j и занести их в таблицу.

5. Определить приращения Δn_i^j показаний ИД как разницу между последующими и предыдущими показаниями

$$\Delta n_i^j = n_i^j - n_i^{j-1}.$$

Результаты вычислений занести в таблицу.

6. Вычислить опытную величину нормальных напряжений в местах тензорезисторов 1, 2, 3, 4 и 5 по формуле (7.5), а величину главных напряжений в местах тензорезисторов 6 и 7 — по формуле (7.6), подставляя в формулы вместо Δn_i среднеарифметическое значение Δn_i^{cp} для нескольких нагружений:

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\Delta n_i^1 + \Delta n_i^2}{2}.$$

7. Определить теоретические значения нормальных напряжений в точках 1, 2, 3, 4 и 5 по формуле (7.2) и главных напряжений в точках 6 и 7 по формуле (7.4) на ступень нагрузки ΔP , используя эпюры Q и M (см. рис 7.1).
8. Определить расхождение между теоретическими и опытными значениями напряжений в процентах по формуле

$$\delta_i = \frac{\sigma_i^{\text{т}} - \sigma_i^{\text{оп}}}{\sigma_i^{\text{оп}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

9. Построить эпюры нормальных напряжений в сечении балки на основании полученных опытных и теоретических данных.
10. Оформить отчет по требуемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Схема нагружения балки и расположения тензорезисторов.
5. Таблица с результатами измерений.
6. Вычисления экспериментальных и теоретических значений нормальных напряжений в точках 1, 2, 3, 4, 5 и главных напряжений в точках 6 и 7.
7. Расхождения между опытными и теоретическими значениями напряжений.

8. Эпюры нормальных напряжений в сечении балки для опытных и теоретических значений.
9. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какой вид нагружения называется изгибом?
2. Что такое изгибающий момент и поперечная сила?
3. Как вычисляют изгибающий момент в поперечных сечениях бруса?
4. Как определяются касательные напряжения в поперечных сечениях при изгибе?
5. Как экспериментально определяются главные напряжения балки?
6. Как изменяются теоретические и экспериментальные значения напряжений по сечению балки?
7. Как определяются напряжения электротензометрическим методом?

Отчет о лабораторной работе № 7 Определение напряжений в балке при прямом поперечном изгибе

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

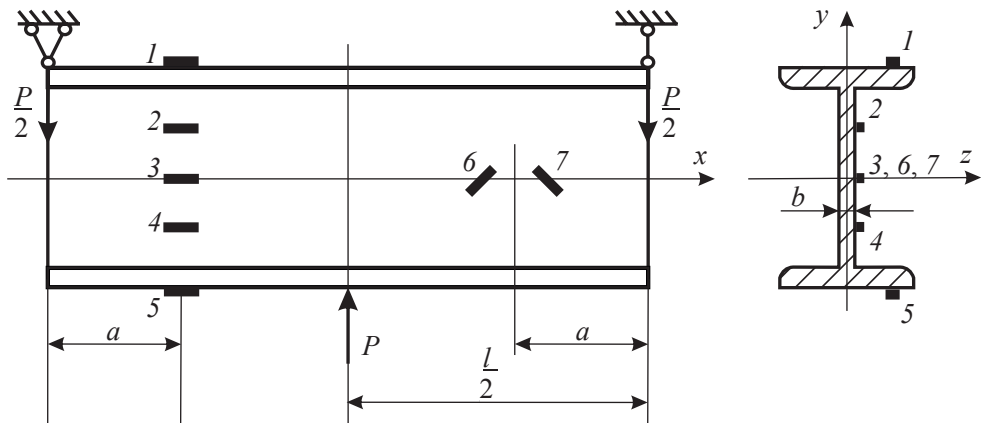
Измерительные приборы: _____

Единица дискретности ИД при измерениях напряжения
 $K_{\sigma} =$ МПа;

модуль Юнга $E =$ ГПа;
коэффициент Пуассона $\mu =$;

коэффициент перевода показаний манометра $K_M = \frac{\text{Н}}{\text{кгс} / \text{см}^2}$.

Схемы нагружения балки и расположения тензорезисторов



Размеры и геометрические характеристики сечения балки

$l =$ см;
 $I_z =$ см³; $(S_z^{\text{отс}})_{\text{max}} =$ см³; $W_z =$ см³; $b =$ см;

расстояние между тензорезисторами в сечении мм.

Расстояние $a =$ см;
 степень давления $\Delta p =$ кгс/см²;
 степень нагружения балки $\Delta P = \Delta p K_M =$ = Н;
 поперечная сила в сечении $a Q_y = \frac{\Delta P}{2} =$ Н;
 изгибающий момент в сечении $a M_z = \frac{\Delta P}{2} a =$ Н · м.

Таблица экспериментальных данных

Номера тензодатчиков, i	Нагрузка P_j , кН (p_j , кгс/см ²)					Среднее значение приращения Δn_i^j показаний ИД при нескольких нагружениях $\Delta n_i^{cp} = \frac{\Delta n_i^1 + \Delta n_i^2}{2}$
	$P_0 = 0$ ($p_0 = 0$)	$P_1 =$ ($p_1 =$)	$P_2 =$ ($p_2 =$)	Показания и приращения показаний ИД для i -го тензодатчика, в ед. шкалы прибора		
	n_i^0	n_i^1	Δn_i^1	n_i^2	Δn_i^2	
	1					
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Нормальные напряжения для точек 1–5

Опытные

$$\sigma_i^{оп} = \Delta n_i^{cp} K_\sigma$$

$$\sigma_1^{оп} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_2^{оп} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_3^{оп} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_4^{оп} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_5^{оп} = \text{МПа.}$$

Теоретические

$$\sigma_i^T = \frac{M_z}{I_z} y_i$$

$$\sigma_1^T = \text{МПа,}$$

$$\sigma_2^T = \text{МПа,}$$

$$\sigma_3^T = \text{МПа,}$$

$$\sigma_4^T = \text{МПа,}$$

$$\sigma_5^T = \text{МПа.}$$

Главные напряжения для точек 6–7

Опытные

$$\sigma_6^{\text{оп}} = \frac{(\Delta n_6^{\text{сп}} + \mu \Delta n_7^{\text{сп}}) K_\sigma}{1 - \mu^2}$$

$$\sigma_7^{\text{оп}} = \frac{(\Delta n_7^{\text{сп}} + \mu \Delta n_6^{\text{сп}}) K_\sigma}{1 - \mu^2}$$

$$\sigma_6^{\text{оп}} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_7^{\text{оп}} = \text{МПа.}$$

Теоретические

$$\sigma_6^{\text{Т}} = + \frac{Q_y (S_z^{\text{отс}})_{\text{max}}}{I_z b_y}$$

$$\sigma_7^{\text{Т}} = - \frac{Q_y (S_z^{\text{отс}})_{\text{max}}}{I_z b_y}$$

$$\sigma_6^{\text{Т}} = \text{МПа,}$$

$$\sigma_7^{\text{Т}} = \text{МПа.}$$

Расхождение между опытными и теоретическими значениями напряжений

$$\delta_1 = \%,$$

$$\delta_2 = \%,$$

$$\delta_3 = \%,$$

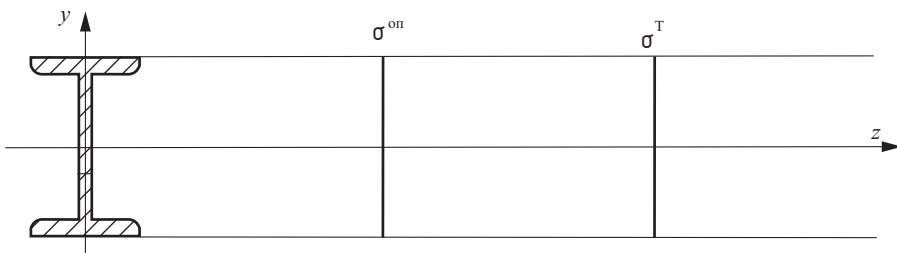
$$\delta_4 = \%,$$

$$\delta_5 = \%,$$

$$\delta_6 = \%,$$

$$\delta_7 = \%.$$

Эпюры нормальных напряжений, построенные на основании полученных опытных и теоретических данных



Выводы по работе: _____

Отчет принял _____

Лабораторная работа № 8

Определение перемещений при прямом изгибе балки

В лабораторной работе проводится испытание на прямой изгиб стальной балки прямоугольного поперечного сечения, расположенной на двух опорах.

Цель работы — экспериментально подтвердить теоретические формулы для определения прогиба и угла поворота поперечного сечения балки при деформации прямого изгиба под действием сосредоточенной нагрузки.

Краткие теоретические сведения

Изгиб называется *прямым*, если силовая плоскость совпадает с одной из главных плоскостей инерции поперечного сечения. При плоском прямом изгибе плоскость изгиба и силовая плоскость совпадают.

Кроме расчетов на прочность для элементов конструкций, проводятся расчеты на жесткость. В данных расчетах должны выполняться требования о том, что перемещения (деформации) элементов конструкций не превосходят допускаемых величин. Под перемещениями подразумеваются прогиб $y(x)$ балки в сечении с координатой x и угол поворота сечения $\varphi(x)$.

Прогибом $y(x)$ балки в данном сечении называется перемещение центра тяжести сечения по направлению, перпендикулярному недеформированной оси балки. *Углом поворота сечения* $\varphi(x)$ называется угол, на который поперечное сечение поворачивается по отношению к своему первоначальному положению, оставаясь перпендикулярным к изогнутой оси балки.

Рассмотрим стальную балку длиной l прямоугольного поперечного сечения, закрепленную на двух шарнирных опорах (рис. 8.1). На балку действует вертикальная сосредоточенная сила P , направленная вниз.

Точка приложения силы P находится на расстоянии a от левой опоры. Опорные реакции равны

$$V_1 = \frac{P(l-a)}{l},$$

$$V_2 = \frac{Pa}{l}.$$

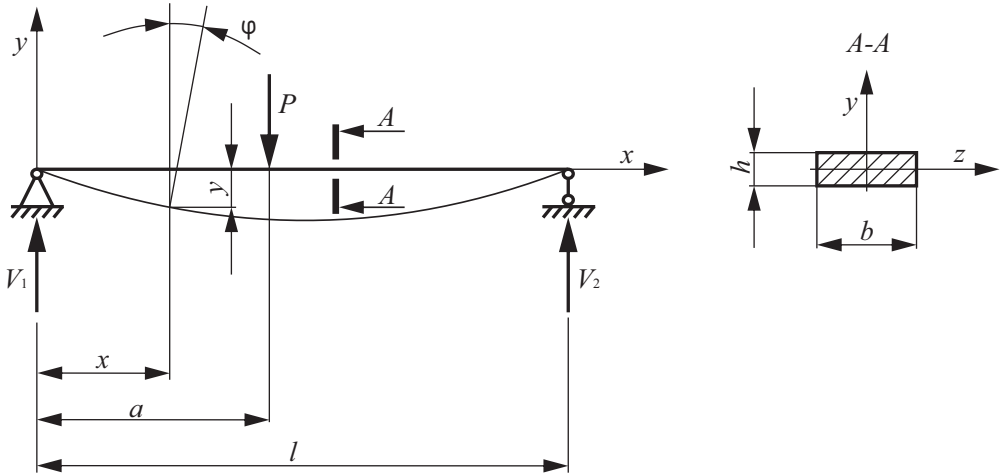


Рис. 8.1. Расчетная схема балки прямоугольного поперечного сечения

Для балки, изображенной на рис. 8.1, согласно методу начальных параметров универсальные уравнения изогнутой оси балки запишутся в виде

$$EI_z y(x) = EI_z y_0 + EI_z \varphi_0 x + \frac{V_1 x^3}{3!} - \frac{P(x-a)^3}{3!} \theta(x-a), \quad (8.1)$$

$$EI_z \varphi(x) = EI_z \varphi_0 + \frac{V_1 x^2}{2!} - \frac{P(x-a)^2}{2!} \theta(x-a), \quad (8.2)$$

где $y(x)$ — прогиб балки в сечении с координатой x ; $\varphi(x)$ — угол поворота сечения с координатой x ; y_0 и φ_0 — начальные параметры, определяемые из граничных условий; E — модуль Юнга; I_z — момент инерции поперечного сечения балки; θ — функция Хевисайда

$$\left(\theta(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < 0 \\ 1, & \omega \geq 0 \end{cases} \right).$$

Для рассматриваемой балки граничные условия имеют следующий вид:

$$\text{при } x = 0 \quad y(0) = 0,$$

$$\text{при } x = l \quad y(l) = 0,$$

тогда начальные параметры равны

$$y_0 = 0,$$

$$\varphi_0 = \frac{P}{6} \left(3a^2 - \frac{a^3}{l} - 2al \right).$$

Из уравнений (8.1) и (8.2) получим, что

$$y(x) = \frac{P}{6EI_z} \left(3a^2x - \frac{a^3x}{l} - 2alx + \frac{l-a}{l}x^3 - (x-a)^3 \theta(x-a) \right), \quad (8.3)$$

$$\varphi(x) = \frac{P}{6EI_z} \left(3a^2 - \frac{a^3}{l} - 2al + \frac{3(l-a)}{l}x^2 - 3(x-a)^2 \theta(x-a) \right). \quad (8.4)$$

Исследование функций (8.3) и (8.4) на экстремум позволяет определить, что при $x = a = \frac{l}{2}$ балка имеет максимальный прогиб y_{\max} , а при $x = 0$ (или $x = l$) и $a = \frac{l}{2}$ максимальный угол поворота φ_{\max} имеют опорные сечения. Максимальные перемещения рассчитываются по формулам

$$y_{\max} = \frac{Pl^3}{48EI_z}, \quad (8.5)$$

$$\varphi_{\max} = \frac{Pl^2}{16EI_z}. \quad (8.6)$$

Описание лабораторной установки

Экспериментальное определение прогиба и угла поворота для подтверждения теоретических формул (8.5) и (8.6) осуществляется на лабораторной установке, общий вид которой представлен на рис. 8.2.

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 8.3. Исследуемая балка δ находится на П-образном приспособ-

соблении 6, представляющем собой горизонтальный металлический брусок с двумя жестко прикрепленными брусками-стойками. С помощью гидравлического домкрата 5 приспособление 6 поднимается вверх, и посредством неподвижного валика 9 происходит нагружение балки 8, к которой прикреплены стойка 1 и фиксатор 3. Валик 9 расположен посередине балки 8. Манометр 4 служит для определения величины давления домкрата 5 на приспособление 6.

Экспериментальное определение значения прогиба $y_{\max}^{\text{оп}}$ производится по показаниям стрелочного индикатора 7, расположенного под балкой 8 (рис. 8.3, 8.4).



Рис. 8.2. Общий вид лабораторной установки

Для экспериментального определения значения угла поворота $\varphi_{\max}^{\text{оп}}$ крайнего опорного сечения используется стрелочный индикатор 2 (рис. 8.4), который установлен на стержне металлического бруска 6 (рис. 8.3). Опытное значение угла поворота $\varphi_{\max}^{\text{оп}}$ можно рассчитать по формуле

$$\text{tg}\varphi_{\max}^{\text{оп}} = \frac{\Delta C \cdot K_{\text{и}}}{l_c},$$

где ΔC — это показания индикатора 2; $K_{\text{и}}$ — цена деления шкалы индикатора 2; l_c — расстояние от нейтрального слоя балки 8 до ножки индикатора 2 (рис. 8.3).

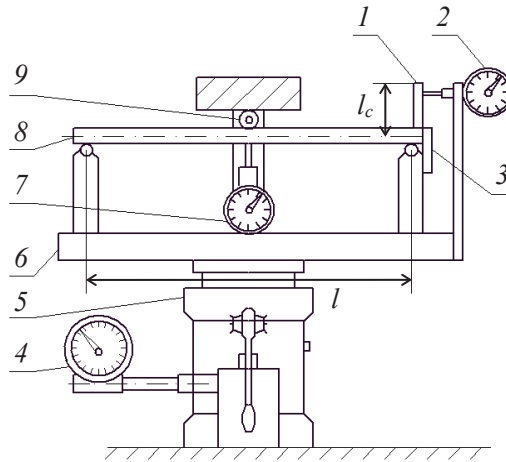


Рис. 8.3. Принципиальная схема лабораторной установки:

1 — стойка; 2, 7 — стрелочные индикаторы; 3 — фиксатор; 4 — манометр; 5 — гидравлический домкрат; 6 — П-образное приспособление, представляющее собой горизонтальный металлический брусок с двумя жестко прикрепленными брусками-стойками; 8 — исследуемая балка; 9 — неподвижный валик

Так как исследования проводятся в пределах выполнения закона Гука, т. е. в пределах упругих деформаций, рассчитанный угол $\varphi_{\max}^{\text{оп}}$ мал, поэтому можно принять с высокой степенью точности приближенное равенство $\text{tg}\varphi_{\max}^{\text{оп}} \approx \varphi_{\max}^{\text{оп}}$.

Следовательно,

$$\varphi_{\max}^{\text{оп}} = \frac{\Delta C \cdot K_{\text{и}}}{l_c}. \quad (8.7)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить длину балки l и размеры поперечного сечения b и h . Затем рассчитать геометрические характеристики поперечного сечения балки: момент инерции и момент сопротивления относительно нейтральной оси сечения.
2. Расположить балку на опорах таким образом, чтобы фиксатор 3 располагался снаружи правой стороны бруска 6, ножки индикаторов 2 и 7 вплотную контактировали со стойкой 1 и исследуемой балкой 8 соответственно (рис. 8.3, 8.4).

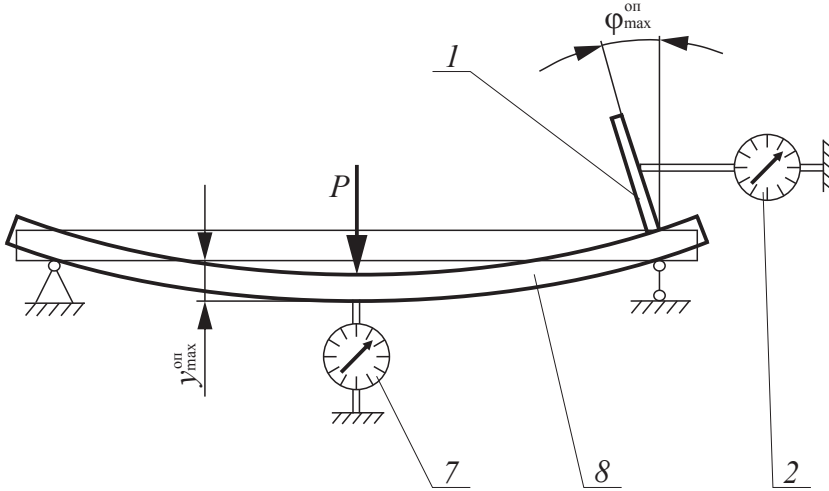


Рис. 8.4. Схема нагружения балки и расположение измерительных приборов

3. Приложить начальное давление p_1 к балке 8 с помощью домкрата 5 и снять показания по индикаторам 7 и 2. Это необходимо для устранения зазоров и люфтов в лабораторной установке, что позволяет в дальнейшем провести существенно более точное измерение деформаций.

Используемый манометр 4 в данной лабораторной работе имеет единицы измерения $\text{кгс}/\text{см}^2$, в которых измеряют техническую атмосферу. Для получения значения действующей на балку 1 силы P необходимо умножить показания манометра на коэффициент перевода K_M :

$$P = pK_M,$$

$$\text{где } [K_M] = \frac{\text{Н}}{\text{кгс} / \text{см}^2}.$$

4. Измерить с помощью индикаторов 7 и 2 величины Δy_i и ΔC_i соответственно, при этом равными ступенями Δp увеличивая давление. Давление при i -ом измерении равно $p_i = p_1 + (i - 1)\Delta p$, где $i = 2, 3, 4$ и т. д. Действующая сила $P_i = p_i K_M$. Результаты измерений занести в таблицу экспериментальных данных. Необходимо следить, чтобы при проведении опыта появляющиеся в балке нормальные напряжения не превышали предела про-

порциональности; таким образом, максимальная нагрузка P_{\max} на балку должна определяться из условия

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq \sigma_{\text{пц}}.$$

Известно, что для малоуглеродистой стали $\sigma_{\text{пц}} = 200$ МПа.

5. Рассчитать прогиб $y_{\max}^{\text{оп}}$ как среднее арифметическое нескольких измерений Δy_i . Полученный результат умножить на цену деления шкалы индикатора $K_{\text{и}}$, где $[K_{\text{и}}] = \frac{\text{мм}}{\text{дел}}$.
6. Рассчитать угол поворота $\varphi_{\max}^{\text{оп}}$ опорного сечения по формуле (8.7), где ΔC определяется как среднее арифметическое нескольких измерений ΔC_i . Полученный результат умножить на цену деления шкалы индикатора $K_{\text{и}}$.
7. Рассчитать теоретические значения прогиба y_{\max} по формуле (8.5) и угла поворота φ_{\max} по формуле (8.6) на ступень нагрузки ΔP .
8. Найти расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями линейных деформаций δ_y и угловых деформаций δ_φ в процентах:

$$\delta_y = \frac{y_{\max} - y_{\max}^{\text{оп}}}{y_{\max}} \cdot 100 \%,$$

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\max}^{\text{оп}}}{\varphi_{\max}} \cdot 100 \%.$$

9. Оформить отчет по требуемой форме.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки.
4. Размеры балки и вычисленные геометрические характеристики сечения.
5. Таблица с экспериментальными данными.

6. Вычисления теоретических и опытных значений максимального прогиба и угла поворота.
7. Сравнение теоретических значений с опытными данными.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какие силовые факторы возникают в бруске при деформации изгиба?
2. Какие величины измеряются индикаторами при испытании балки на изгиб?
3. Какие перемещения получают поперечные сечения балок при прямом изгибе?
4. Какая величина называется прогибом балки в данном сечении?
5. Какая величина называется углом поворота сечения?
6. Приведите основное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки.
7. Почему точное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки можно заменить приближенным уравнением?
8. Какая дифференциальная зависимость существует между прогибами и углами поворота сечений балки?
9. В чем заключается метод начальных параметров? Приведите универсальные уравнения изогнутой оси балки.

Отчет о лабораторной работе № 8 Определение перемещений при прямом изгибе балки

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Лабораторная установка: _____

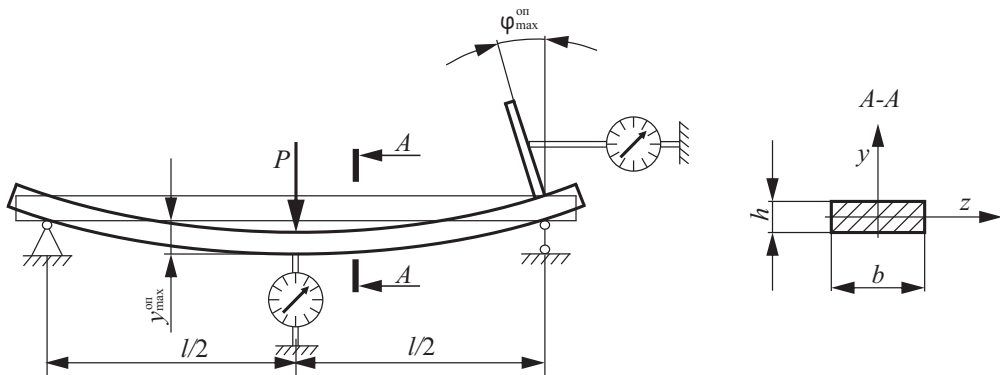
Измерительные приборы: _____

Цена деления шкалы индикаторов $K_{и} = \frac{\text{мм}}{\text{дел}}$;

коэффициент перевода показаний манометра $K_{м} = \frac{\text{Н}}{\text{кгс} / \text{см}^2}$;

модуль Юнга $E =$ Па.

Схема нагружения балки и расположение измерительных приборов



Размеры балки и геометрические характеристики поперечного сечения:

$$l = \quad \text{м}; b = \quad \text{м}; h = \quad \text{м};$$

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \quad = \quad \text{м}^4;$$

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \quad = \quad \text{м}^3.$$

Расстояние $l_c = \quad \text{м}$.

Начальное давление $p_1 = \quad \text{кгс/см}^2$.

Степень давления $\Delta p = \quad \text{кгс/см}^2$.

Степень нагружения балки $\Delta P = \Delta p K_M = \quad = \quad \text{Н}$.

$p_i = p_1 + (i - 1)\Delta p$, где $i = 2, 3, 4, \dots$

$P_i = p_i K_M$, где $i = 1, 2, 3, \dots$

$\Delta y_i = Y_i - Y_{i-1}$, $\Delta C_i = C_i - C_{i-1}$, где $i = 2, 3, 4, \dots$

Таблица экспериментальных данных

Номер измерения, i	Показания манометра p_i , кгс/см ²	Нагрузка P_i , Н	Показания и приращения показаний индикаторов, в дел. шкалы приборов			
			на балке		на стойке	
			y_i	Δy_i	C_i	ΔC_i
1			0	 	0	
2						
3						

Средние значения приращений отсчетов

$$\Delta y_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=2}^n \Delta y_i}{n-1} = \quad ; \Delta C_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=2}^n \Delta C_i}{n-1} = \quad .$$

Опытные значения максимального прогиба и угла поворота

$y_{\text{max}}^{\text{оп}} = \Delta y_{\text{cp}} K_n = \quad = \quad \text{м};$

$\phi_{\text{max}}^{\text{оп}} = \frac{\Delta C_{\text{cp}} K_n}{l_c} = \quad = \quad \text{рад}.$

Теоретические значения максимального прогиба и угла поворота

$$y_{\max} = \frac{\Delta P l^3}{48 E I_z} = \quad = \quad \text{м};$$

$$\varphi_{\max} = \frac{\Delta P l^2}{16 E I_z} = \quad = \quad \text{рад.}$$

Расхождение в процентах

$$\delta_{\varphi} = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\max}^{\text{оп}}}{\varphi_{\max}} \cdot 100 \% = \quad = \quad \%;$$

$$\delta_y = \frac{y_{\max} - y_{\max}^{\text{оп}}}{y_{\max}} \cdot 100 \% = \quad = \quad .$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял _____

Лабораторная работа № 9

Исследование деформации растяжения цилиндрической винтовой пружины

В данной работе проводится испытание стальной цилиндрической винтовой пружины на растяжение. Цель работы — экспериментально подтвердить линейную зависимость между нагрузкой на пружину и ее удлинением, определить модуль сдвига материала проволоки и коэффициент податливости пружины.

Краткие теоретические сведения

Пружины — это упругие элементы современных механизмов и машин, которые можно использовать в качестве амортизаторов и рессор, в виде источников энергии, для приведения в движение механизмов, для возврата движущихся деталей в исходное положение. Винтовые пружины по форме подразделяют на конические, цилиндрические и фасонные.

В инженерной технике активно используются цилиндрические винтовые пружины, представляющие собой тонкий стержень с осью в виде винтовой линии. Они воспринимают осевую нагрузку и работают на растяжение (рис. 9.1, *а*) или на сжатие (рис. 9.1, *б*). Пружины растяжения навивают без просвета между витками, пружины сжатия — с просветом.

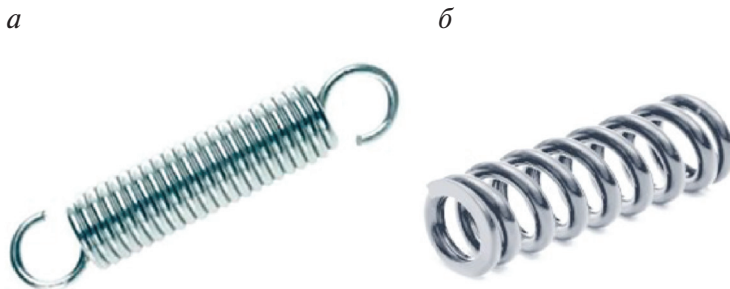


Рис. 9.1. Цилиндрические винтовые пружины растяжения (*а*) и сжатия (*б*)

В данной лабораторной работе исследуется стальная цилиндрическая винтовая пружина с углом подъема витка α , не превышающим 15° , для нее соблюдается условие $\frac{h}{D} \ll 1$ (рис. 9.2, а), где h — шаг пружины; D — средний диаметр пружины. С учетом этих условий проводят расчет на прочность и жесткость винтовых пружин, считая, что витки лежат в плоскости, перпендикулярной к оси пружины. При определении удлинения при растяжении пружины (или осадки при сжатии) витки рассматривают в виде прямого стержня, испытывающего только кручение, а влиянием продольных деформаций, изгибающих деформаций и среза пренебрегают. Вследствие этих упрощений формула для определения удлинения λ цилиндрической винтовой пружины (рис. 9.2, а), т. е. изменение длины пружины (ее участка) вдоль оси, имеет вид

$$\lambda = \frac{8PD^3n}{Gd^4}, \quad (9.1)$$

где D — средний диаметр пружины; P — сила, приложенная вдоль оси пружины; n — число витков пружины в пределах расчетной длины; G — модуль упругости при сдвиге материала пружины; d — диаметр проволоки пружины.

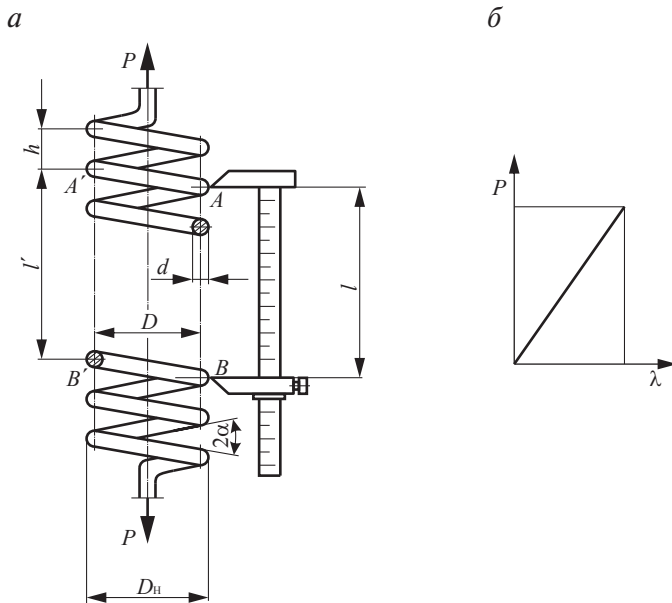


Рис. 9.2. Цилиндрическая винтовая пружина (а) и линейная зависимость (б) между удлинением λ пружины и нагрузкой P

Формула (9.1) справедлива при условии выполнения закона Гука. Согласно выражению (9.1) между удлинением λ пружины и нагрузкой P существует линейная зависимость (рис. 9.2, б), для проверки которой производят нагружение пружины нарастающими усилиями, отличающимися на величину ΔP (ступень нагрузки), и измеряют удлинение пружины.

Модуль упругости при сдвиге материала пружины определяется из формулы (9.1):

$$G = \frac{8\Delta P D^3 n}{\Delta \lambda_{\text{ср}} d^4}, \quad (9.2)$$

где $\Delta \lambda_{\text{ср}}$ — среднее приращение удлинения на ступень нагружения; ΔP — ступень нагрузки.

Коэффициент жесткости $k = \frac{P}{\lambda}$ цилиндрической винтовой пружины вычисляется по формуле

$$k = \frac{G d^4}{8 D^3 n}. \quad (9.3)$$

Жесткость пружины k численно равна величине силы, вызывающей единичную деформацию: сила измеряется в ньютонах, деформация — в метрах.

Величина, обратная жесткости (9.3), — податливость $c = \frac{\lambda}{P}$. Податливость — это величина, численно равная деформации пружины, вызванной действием единичной силы.

Податливость одного витка пружины

$$c' = \frac{\lambda}{P n} = \frac{8 D^3}{G d^4}. \quad (9.4)$$

Экспериментальными методами коэффициент податливости одного витка пружины определяется через отношение измеренного удлинения участка пружины $\lambda_{\text{оп}}$ или всей пружины к величине усилия P , вызвавшего это растяжение, и к числу витков участка n или к общему числу витков пружины:

$$c'_{\text{оп}} = \frac{\lambda_{\text{оп}}}{P n}. \quad (9.5)$$

Описание лабораторной установки

Экспериментальное исследование растяжения пружины осуществляется на машине МИП-100-2, общий вид которой представлен на рис. 9.3.



Рис. 9.3. Машина МИП-100-2 для испытания пружин

Согласно принципиальной схеме машины МИП-100-2 (рис. 9.4) величину нагрузки определяют по циферблатной шкале силоизмерителя 1. Испытуемая пружина 10 устанавливается между крюками (пружина растяжения) или тарелями 8 и 11 (пружина сжатия). При испытании пружины растяжения тарель заменяют реверсом 2. С помощью компенсационной пружины 6 тарель 8 соединена с подвижной кареткой 5, перемещающейся по направляющим колоннам 4. Шток 3 с цапговым упором служит для настройки на заданный ход. Деформацию измеряют по шкале 7 с помощью нониуса. Для настройки на нужный размер пружины служит выдвижной упор 13, перемещаемый враще-

нием рукоятки 12. Когда шток 9, жестко связанный с верхней тарелью, находит на упор, стержень 14 утапливается и своим нижним концом воздействует на микропереключатель. Двигатель отключается, и верхняя тарель 8 останавливается, причем размер пружины оказывается зафиксированным, а инерционный перегиб каретки 5 компенсируется за счет сжатия пружины 6. Для работ по настройке и испытанию отдельных пружин предусмотрен ручной привод от маховика 15.

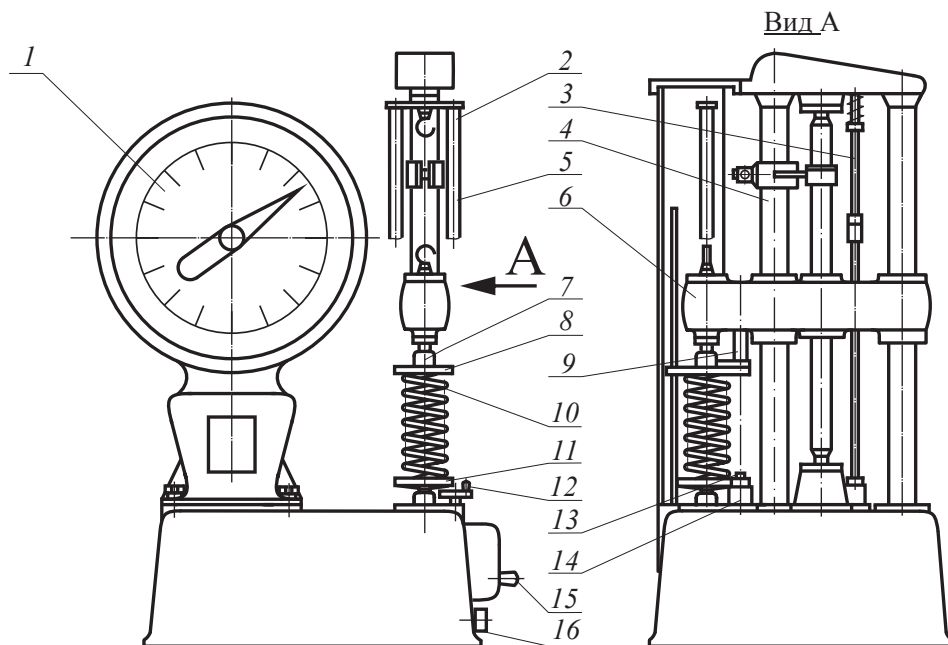


Рис. 9.4. Принципиальная схема машины МИП-100-2

1 — циферблатная шкала силоизмерителя; 2 — реверс; 3 — шток с цанговым упором; 4 — направляющая колонна; 5 — подвижная каретка; 6 — компенсационная пружина; 7 — шкала с нониусом; 8 — верхняя тарель; 9 — шток; 10 — испытываемая пружина; 11 — нижняя тарель; 12 — рукоятка для перемещения выдвигного упора; 13 — выдвигной упор; 14 — стержень, действующий на микропереключатель; 15 — ручной привод от маховика; 16 — ручка настройки

Порядок выполнения работы

1. Не менее трех раз измерить наружный диаметр пружины D_n и рассчитать среднее арифметическое значение величины.
2. Не менее трех раз измерить диаметр сечения витка пружины d и рассчитать среднее арифметическое значение величины.

3. Рассчитать средний диаметр пружины D по формуле $D = D_n d$.
4. Подсчитать число витков n пружины, находящихся между точками A и B (A' и B') (рис. 9.2). Рассматриваемые точки нанесены на диаметрально противоположных сторонах пружины.
5. Пружину 10 подвесить на крюки испытательной машины МИП-100-2 с максимально возможной нагрузкой 1000 Н (100 кгс) (рис. 9.4). Нижний крюк машины подвижный. Расстояние между крюками регулировать вращением рукоятки 15 .
6. С помощью ручки настройки 16 установить стрелку силоизмерителя 1 на ноль.
7. Вращением рукоятки 15 установить начальную нагрузку пружины $P_1 = 100$ Н (10 кгс).
8. С помощью штангенциркуля измерить расстояние l_1 и l'_1 между точками A и B , A' и B' (рис. 9.2). Рассчитать среднее арифметическое значение $l_{\text{cp},1} = \frac{l_1 + l'_1}{2}$.
9. Провести еще три исследования пружины путем увеличения нагрузки каждый раз на величину $\Delta P_i = 200$ Н (20 кгс): $P_i = P_1 + (i-1)\Delta P$, $i = 2, 3, 4$. Наибольшее усилие на пружину со стороны испытательной машины МИП-100-2 не должно превышать 900 Н (90 кгс). После каждого увеличения нагрузки измерить расстояния l_i и l'_i между точками A и B , A' и B' и по их средним арифметическим значениям $l_{\text{cp},i}$ и $l_{\text{cp},i-1}$ определить приращение удлинения по формуле $\Delta \lambda_i = l_{\text{cp},i} - l_{\text{cp},i-1}$.
10. Экспериментальные измерения расстояний l_i и l'_i и вычисления приращений $\Delta \lambda_i$ внести в таблицу формы отчета и подсчитать среднее значение приращения удлинения измеряемого участка пружины $\Delta \lambda_{\text{cp}}$ как среднее арифметическое значение рассчитанных приращений $\Delta \lambda_i$ ($i = 2, 3, 4$).
11. Построить график зависимости удлинения λ от нагрузки P и провести его анализ, используя рассчитанные значения приращений $\Delta \lambda_i$ и величины нагрузок P_i .
12. По формуле (9.2) рассчитать модуль сдвига и сравнить его со средним значением $G = 80$ ГПа, которое принимается при расчетах.
13. По формуле (9.1) рассчитать удлинение пружины $\Delta \lambda$ от нагрузки ΔP .

14. Вычислить теоретический c' и опытный $c'_{\text{оп}}$ коэффициенты податливости одного витка пружины по формулам (9.4) и (9.5).
15. Сравнить теоретическую и опытную величины коэффициентов податливости одного витка пружины

$$\delta = \frac{c' - c'_{\text{оп}}}{c'_{\text{оп}}} \cdot 100 \%$$

16. Оформить отчет о лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение теоретических основ.
3. Описание лабораторной установки и назначения отдельных блоков.
4. Схема установки и размеры исследуемой пружины.
5. Таблица с результатами измерений.
6. Вычисления теоретических значений модуля сдвига и удлинения пружины.
7. Сравнение теоретического значения податливости пружины с опытными данными.
8. Выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Как должны быть приложены внешние силы, чтобы прямой брус испытывал деформацию кручения?
2. По какой формуле вычисляется момент, действующий на вал, если известна передаваемая мощность и число оборотов в единицу времени?
3. На каких предположениях основывается теория кручения прямого бруса круглого поперечного сечения?
4. Какая деталь называется пружиной?
5. Назовите области применения пружин.
6. Назовите отличия пружин сжатия от пружин растяжения.

7. Какой вид деформации испытывают витки цилиндрической винтовой пружины?
8. По какой формуле вычисляется линейная деформация цилиндрической винтовой пружины? На каких допущениях основана формула для вычисления деформаций?
9. Дайте определения жесткости и податливости пружины. Приведите формулы для жесткости и податливости пружины.

Отчет о лабораторной работе № 9
Исследование деформации растяжения цилиндрической винтовой пружины

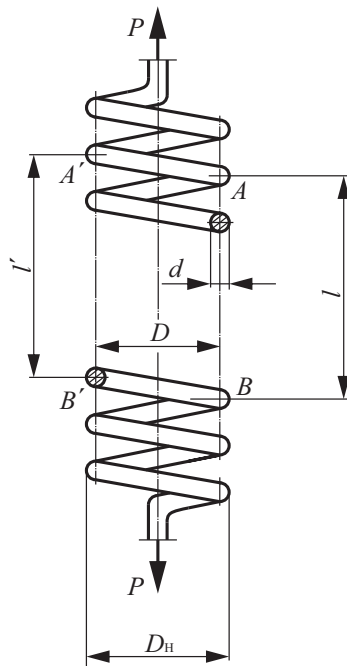
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Испытательная машина: _____

Измерительные приборы: _____

Схема нагружения и измерения



Данные пружины до деформации

Номер измерения, i	Наружный диаметр D_{ni} , см	Диаметр проволоки d_i , см
1		
2		
3		

$$\text{Средний наружный диаметр } D_n = \frac{\sum_{i=1}^3 D_{ni}}{3} = \quad = \quad \text{см.}$$

$$\text{Средний диаметр проволоки } d = \frac{\sum_{i=1}^3 d_i}{3} = \quad = \quad \text{см.}$$

$$\text{Средний диаметр пружины } D = D_n - d = \quad = \quad \text{см.}$$

$$\text{Число витков на участке измерения } n = \quad \text{шт.}$$


Деформация пружины

Начальное усилие пружины равно нагрузке $P_1 = 100$ Н.

Нагружение пружины проводится ступенями $\Delta P = 200$ Н.

$$P_i = P_1 + (i-1)\Delta P, \quad i = 2, 3, 4.$$

Таблица экспериментальных данных

Номер измерения, i	Нагрузка P_i , Н	Отсчеты по приборам			Приращение удлинения $\Delta\lambda_i$, мм
		Левый l'_i , мм	Правый l_i , мм	$l_{cp,i} = \frac{l_i + l'_i}{2}$, мм	
1					
2					
3					
4					

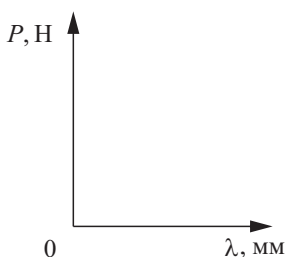
Среднее приращение удлинения пружины $\Delta\lambda_{cp}$, мм:

$$\Delta\lambda_{cp} = \frac{\Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3 + \Delta\lambda_4}{3} = \quad = \quad \text{мм.}$$

Таблица данных для построения диаграммы растяжения

Номер точки, i	1	2	3	4
λ , мм	0	$\Delta\lambda_2 =$	$\Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3 =$ =	$\Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3 + \Delta\lambda_4 =$ =
P , Н	$P_1 =$	$P_2 =$	$P_3 =$	$P_4 =$

Диаграмма растяжения пружины



Экспериментальное значение модуля упругости при сдвиге

$$G = \frac{8\Delta PD^3 n}{\Delta\lambda_{\text{cp}} d^4} = \quad = \quad \text{Па.}$$

Теоретическое удлинение пружины

$$\Delta\lambda = \frac{8\Delta PD^3 n}{Gd^4} = \quad = \quad \text{мм.}$$

Теоретический коэффициент податливости одного витка пружины

$$c' = \frac{\Delta\lambda}{\Delta Pn} = \quad = \quad \frac{\text{мм}}{\text{Н}}.$$

Опытный коэффициент податливости одного витка пружины

$$c'_{\text{оп}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{cp}}}{\Delta Pn} = \quad = \quad \frac{\text{мм}}{\text{Н}}.$$

Расхождение в процентах

$$\delta = \frac{c' - c'_{\text{оп}}}{c'_{\text{оп}}} 100 \% = \quad = \quad \%.$$

Выводы по работе: _____

Отчет принял

Библиографический список

1. Поляков, А. А. Сопротивление материалов / А. А. Поляков. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 275 с. — ISBN 978-5-321-02299-3.
2. Дарков, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. — Москва : Высшая школа, 1975. — 654 с.

Приложение 1

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01

1. Назначение

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (далее — прибор) применяется для измерения деформаций при статическом напряжении и используется в составе универсальных стендов СМ-1 при выполнении лабораторных практикумов по дисциплинам «Соппротивление материалов», «Прикладная механика», «Техническая механика» в высших и средних профессиональных учебных заведениях машиностроительного и приборостроительного профиля. Прибор предназначен для работы при температурах от +10 до +35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при 25 °С.

2. Технические характеристики

- 2.1. Электрическая схема соединений тензорезисторов на объекте измерений полумост
- 2.2. Диапазон измерений, мкОм/Ом..... ±5999
- 2.3. Количество сдвигов диапазона измерений переключателем ДИАПАЗОН:
в положительную сторону..... 5
в отрицательную сторону 5
- 2.4. Дискретный шаг сдвига диапазона измерений переключателем ДИАПАЗОН, единиц индикации...±1000±10
- 2.5. Напряжение питания полумоста, В..... 9±0,2
- 2.6. Номинальное сопротивление применяемых на объекте измерений тензорезисторов, Ом 100÷400
- 2.7. Стабильность показаний прибора при неоднократных измерениях деформации, единиц индикации, не более 5
- 2.8. Количество измерительных каналов 11
- 2.9. Длина соединительного кабеля между прибором и объектом измерений, м, не более 12

- 2.10. Потребляемая мощность, В·А, не более 10
- 2.11. Электропитание прибора от сети переменного тока:
напряжение, В 220 ± 22
частота, Гц..... $50 \pm 0,4$
- 2.12. Габаритные размеры, мм:
длина 260
ширина..... 180
высота..... 77
- 2.13. Масса, кг, не более 2,5
- 2.14. Средний срок службы до списания, лет 5
- 2.15. Готовность прибора к работе
после включения, мин..... 10

3. Комплектность

Комплект поставки должен соответствовать указанному:

Наименование изделия	Количество
Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01	1 шт.
Кабель соединительный	1 шт.
Паспорт измерителя деформации тензометрического цифрового ИДТЦ-01	1 шт.

4. Меры безопасности

4.1. К работе с прибором допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом действия и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.

4.2. По требованиям электробезопасности прибор соответствует III классу защиты от поражения электрическим током ГОСТ 12.2.007.0-75.

4.3. Запрещается эксплуатация прибора, а также любые ремонтные работы со снятым кожухом без отключения его от сети с помощью сетевой вилки.

4.4. Запрещается во время работы отключать кабель, соединяющий между собой прибор и объект измерений.

5. Устройство и принцип работы

5.1. Внешний вид изделия приведен на рис. П.1.

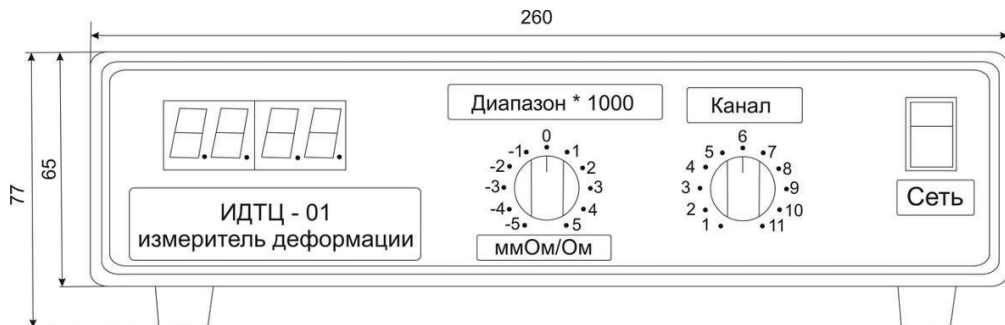


Рис. П.1. Внешний вид измерителя деформации

5.2. Прибор содержит следующие блоки:

- блок питания;
- блок измерительного устройства;
- блок индикации.

На лицевой панели находятся индикатор, переключатели КАНАЛ, ДИАПАЗОН, переключатель сетевой с подсветкой. На задней стенке находится разъем для подключения к прибору соединительного кабеля, сетевой предохранитель, шнур электропитания.

5.3. Прибор позволяет измерять электрические сигналы с тензорезисторов и представлять результаты измерений в цифровом виде.

В блоке применен 3,5-разрядный АЦП. В качестве индикаторов используются семисегментные светодиодные матрицы.

6. Порядок работы

6.1. Включите переключатель сетевой с подсветкой. При этом индикатор высвечивает любое цифровое показание.

6.2. Переключателем КАНАЛ выберите нужный тензорезистор.

6.3. В случае разбаланса выбранного канала происходит переполнение индикатора (горит «-1» или «1» только в старшем разряде индикатора), необходимо в соответствии со знаком в старшем разряде путем поворота переключателя ДИАПАЗОН в ту или иную сторону добиться показаний в младших разрядах индикатора.

Измеряемое показание будет соответствовать алгебраической сумме показаний индикатора и положению переключателя ДИАПАЗОН. Данные значения могут быть как положительными, так и отрицательными.

Приложение 2

Блок измерения усилий

1. Назначение

Блок измерения усилий (далее — блок) предназначен для измерения силы, действующей в одной координатной плоскости и положенной к датчику усилия ГИЯА 408661.001 в статическом режиме. Блок и датчики рассчитаны на измерение усилий в трех диапазонах: $0 \div 0,05$; $0,05 \div 0,5$; $0,5 \div 5,0$ кН — при выполнении лабораторных работ на комплексе универсальном учебном СМ-1.

2. Технические характеристики

2.1. Потребляемая мощность, В·А, не более	10
2.2. Электропитание от сети переменного тока:	
напряжение, В	220 ± 20
частота, Гц	$50 \pm 0,4$
2.3. Погрешность измерения, %, не более	5
2.4. Габаритные размеры блока, мм, не более	
длина	260
ширина	180
высота	60
2.5. Габаритные размеры датчика усилий, мм, не более	
длина	100
ширина	50
высота	85
2.6. Масса блока, кг, не более	2,5
2.7. Средний срок службы до списания, лет,	
не менее	5
2.8. Готовность прибора к работе	
после включения, мин	0

3. Устройство и принцип работы

3.1. Внешний вид блока приведен на рис. П.2.

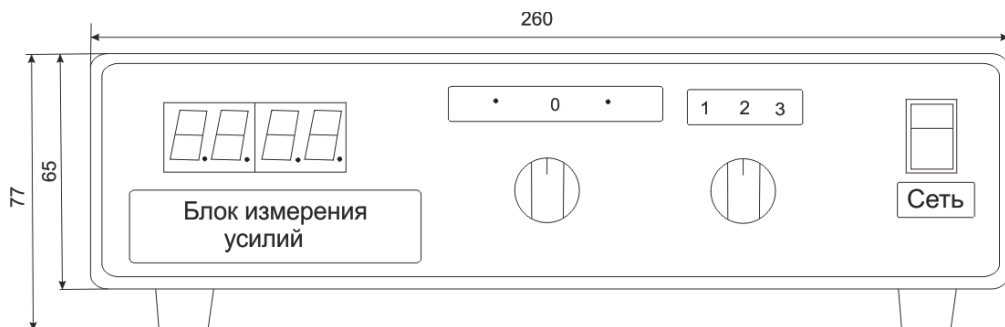


Рис. П.2. Внешний вид блока измерения усилий

3.2. Блок предназначен для измерения силы, действующей на датчик усилий в трех диапазонах ($0 \div 0,05$; $0,05 \div 0,5$; $0,5 \div 5,0$ кН), и вывода результатов измерений на цифровое табло индикации с отображением знака прилагаемого усилия: (' - ') — усилие сжатия, отсутствие знака — усилие растяжения.

Органы управления и индикации выведены на лицевую панель блока. Имеется кнопка включения питающего напряжения, цифровое табло отображения результатов измерений, переключатель диапазонов измерения, регулятор установки «нуля».

Через соединительный кабель к блоку подключается один из датчиков усилия.

3.3. Внешний вид датчика усилий приведен на рис. П.2.

3.4. Датчик усилий — тензометрический преобразователь, предназначенный для преобразования механической деформации в электрический сигнал.

Для измерений силы в трех диапазонах используются три датчика.

Датчик усилий выполнен в виде скобы. На скобу наклеены тензорезисторы, которые соединены электрическими проводами по схеме полумоста и выведены на общий разъем датчика.

4. Меры безопасности

4.1. К работе с блоком допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом действия и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.

4.2. Работы, связанные с подготовкой блока к эксплуатации, его обслуживанием, производить, не подключая блок к питающей сети.

4.3. Запрещается во время работы отключать кабель, соединяющий между собой блок и датчик усилий.

4.4. Во избежание поломки измерительной скобы датчика запрещается нагружать выбранный датчик усилием, большим, чем максимальное указанное на датчике.

4.5. Запрещается работа с блоком при открытой крышке.

4.6. После проведения работы с блоком необходимо отключать блок от сети питания.

5. Подготовка к работе

5.1. Соедините блок с датчиком усилий кабелем.

5.2. Подключите блок к сети питания.

5.3. Нажмите кнопку включения питающего напряжения на лицевой панели. Должно засветиться цифровое табло индикации.

5.4. Дайте прогреться прибору не менее 10 мин.

6. Порядок работы

6.1. Установите переключатель диапазона измерений в положение, соответствующее максимальному значению измеряемых усилий подключенного датчика:

Положение переключателя диапазона измерений	Максимальное значение усилий, кН
1	0,05
2	0,5
3	5,0

6.2. Выставьте ручкой регулятора «ноль» на цифровом табло в трех младших разрядах — «000». Установка «000» производится после каждого снятия нагрузки.

Установка «нуля» производится при подключенных датчиках усилий в соответствии с воздействием на них нагружающей силы.

6.3. Производите нагружение образца и измерение усилий согласно паспорту на комплекс универсальный учебный СМ-1.

Учебное издание

Кислов Алексей Николаевич
Ковалев Олег Сергеевич
Гусакова Наталья Анатольевна
Селезнева Светлана Евгеньевна
Ходак Анастасия Сергеевна
Черногубов Дмитрий Евгеньевич
Чернобородова Светлана Валентиновна
Чупин Владимир Васильевич

**СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ.
ПРОСТЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ**

Редактор *Т. Е. Мерц*
Верстка *О. П. Игнатъевой*

Подписано в печать 23.11.2021. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 5,5. Тираж 30 экз. Заказ 259.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@ustu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

