

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Математические методы в строительстве»

## МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Пособие  
для студентов специальности 1-36 11 01  
«Инновационная техника для строительного комплекса  
(по направлениям)»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск  
БНТУ  
2023

УДК 620.1 (075.8)  
ББК 30.121я7  
М55

С о с т а в и т е л и:  
*О. Л. Вербицкая, Л. И. Шевчук,  
Е. А. Евсеева, П. Д. Скачек*

Р е ц е н з е н т ы:  
зав. кафедрой «Механика и конструирование» Белорусского  
государственного технического университета  
канд. техн. наук, доцент *О. И. Карпович*;  
канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика материалов  
и деталей машин» Белорусского государственного аграрного  
технического университета *В. Н. Основин*

**Механика** материалов и конструкций : пособие для студентов  
М55 специальности 1-36 11 01 «Инновационная техника для строительного  
комплекса (по направлениям)» : в 2 ч. / сост. : О. Л. Вербицкая  
[и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Ч. 1. – 111 с.  
ISBN 978-985-583-847-1 (Ч. 1).

В пособии содержатся лабораторные работы, предусмотренные учебной программой по механике материалов и конструкций для студентов специальности 1-36 11 01 «Инновационная техника для строительного комплекса (по направлениям)». Дано описание измерительных приборов и испытательных машин, используемых при выполнении лабораторных работ, методов испытания материалов и исследования напряженного и деформированного состояний элементов конструкций. Для каждой лабораторной работы приводятся ее цель, краткие теоретические сведения, схема и принцип действия испытательной установки, последовательность выполнения, образец журнала результатов испытаний.

Методика проведения лабораторных работ включает внеаудиторное изучение теории, подготовку журнала, его заполнение, проведение исследований и обработку опытных данных. Используя настоящее пособие и консультации преподавателя, студентами изучаются механические свойства материалов и методы их испытаний.

УДК 620.1 (075.8)  
ББК 30.121я7

ISBN 978-985-583-847-1 (Ч. 1)  
ISBN 978-985-583-846-4

© Белорусский национальный  
технический университет, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы прочности, упругости, пластичности и жесткости материалов имеют большое значение в строительстве, машиностроении, приборостроении, радиотехнике и прочих отраслях промышленности. Ошибки при определении механических свойств материалов, неудачный выбор материалов для изготовления деталей или конструкций, неправильный расчет деталей машин, механизмов и элементов строительных конструкций может привести к их непригодности или к разрушению. Следует отметить, что характеристики прочности, упругости и пластичности материалов можно определить только опытным путем.

В пособие включены лабораторные работы в соответствии с типовыми учебными программами по механике материалов. Все лабораторные работы делятся на две группы. К первой группе относятся лабораторные работы по определению и изучению механических свойств материалов: прочности, пластичности, жесткости, расчетных характеристик. Другая группа лабораторных работ посвящена проверке расчетных формул механики материалов и оценке погрешности результатов, появляющихся за счет принятых гипотез и допущений (плоские сечения, отсутствие давлений волокон) и применению упрощенного закона деформирования материала – закона Гука.

При выполнении лабораторных работ студенты изучают методику испытания материалов на различные виды сопротивления, знакомятся с устройством и принципом действия некоторых измерительных инструментов, приборов, испытательных установок и машин.

В пособие включены:

- описания приборов и испытательных машин, используемых в лабораторных работах;
- описания образцов при испытании материалов на различные виды сопротивлений;
- подробные описания хода выполнения лабораторных работ;
- примеры оформления отчетов по каждой лабораторной работе;
- ссылки на литературу для более глубокого изучения материала.

Навыки, полученные при выполнении лабораторных работ, необходимы специалистам в различных областях машиностроения, так как результаты испытания материалов используются при проектировании различных деталей машин, их изготовлении и эксплуатации.

Пособие подготовлено с использованием материалов, разработанных на кафедре «Математические методы в строительстве» Белорусского национального технического университета, и учебной литературы, приведенной в списке.

## **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

При проведении лабораторных работ по механике материалов на студента могут воздействовать опасные для жизни и вредные для здоровья производственные факторы: электрическое напряжение, подвижные части испытательных машин и установок, острые кромки, заусеницы и шероховатости на поверхности образцов и др.

В лаборатории используется оборудование, в электрических цепях которого проходит ток высокого напряжения, опасного для жизни человека, а также напольные и настольные установки, нагружаемые гириями либо имеющими двигающиеся рабочие детали. Для предотвращения травм студент обязан соблюдать следующие основные правила:

1. Соблюдать правила техники безопасности.
2. Приступать к выполнению лабораторной работы только после разрешения преподавателя или персонала лаборатории.
3. Не приводить в действие машины, механизмы и другие, находящиеся в помещении лаборатории, установки.
4. Во время выполнения лабораторной работы не отвлекаться, не разговаривать друг с другом и по телефону.
5. В случае обнаружения студентом неисправностей, немедленно сообщить об этом преподавателю либо работнику лаборатории.
6. Не производить какие-либо действия с установками, не относящимися к выполняемой лабораторной работе.
7. Не заводить руки в опасные зоны испытания, не включать рубильники, не нажимать на кнопки пульта испытательных машин, не вставлять вилки приборов в розетки электросети, не поворачивать рычаги испытательных установок без указания преподавателя.
8. К лабораторным работам допускаются студенты, ознакомленные с разработанной на кафедре инструкцией по охране труда (только после записи в журнал по охране труда).



## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

1. Перед выполнением очередной лабораторной работы студент обязан подготовиться по соответствующему разделу курса механики материалов, используя учебники и пособия, включая данное пособие.

2. Для выполнения лабораторных работ необходимо иметь бланк протокола лабораторной работы, который следует оформить или ксерокопировать по образцу, приведенному в настоящем пособии.

3. Опоздание или пропуск лабораторных занятий не допускается. Одна пропущенная лабораторная работа расценивается как невыполнение учебного плана, и в этом случае студент не допускается кафедрой к экзамену по механике материалов. В случае пропуска лабораторных занятий студент должен отработать их согласно установленному порядку по разработанному кафедрой графику отработок.

4. В начале занятия под руководством преподавателя и в исполнении инженера лаборатории проводится испытание образца или демонстрация законов механики на испытательной установке. Студенты обязаны находиться на безопасном расстоянии от места испытания и наблюдать за ходом опыта.

5. После окончания испытания студенты занимают свои места в помещении лаборатории, выполняют обработку полученных данных и оформляют протокол, используя данное методическое пособие.

6. В конце занятия студент предъявляет преподавателю для проверки оформленный протокол лабораторной работы.

7. В соответствии с графиком проведения занятий студенты защищают лабораторные работы, отвечая преподавателю на поставленные вопросы, давая пояснения установленным законам и закономерностям механики твердого деформируемого тела, принципам работы приборов и испытательных установок.

# ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ И ПРИБОРАХ

### 1.1. Инструменты для измерения размеров образцов

**1.1.1. Измерительные линейки и ленты.** Для измерения размеров больших деталей и образцов используются линейки и измерительные ленты (рулетки). Цена деления линейки 1 мм. Предпочтительнее выполнять измерения стальными линейками или лентами (рулетками), так как они обладают большой жесткостью, что обеспечивает большую точность измерения.

**1.1.2. Штангенциркуль.** Штангенциркуль применяется для измерения наружных и внутренних размеров небольших деталей и образцов. Кроме того, штангенциркулем можно измерить глубину выемок. При выполнении лабораторных работ используются штангенциркули с пределами измерений от 125 до 500 мм и ценой деления 0,1 мм (рис. 1).

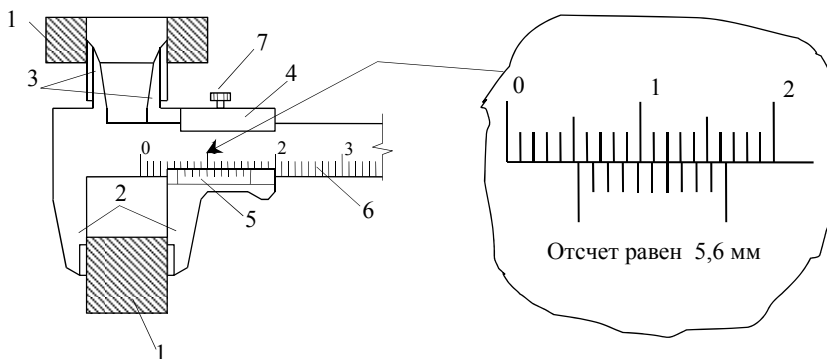


Рис. 1. Схема измерения внешнего и внутреннего размеров с помощью штангенциркуля:

1 – измеряемые детали; 2, 3 – губки штангенциркуля; 4 – рамка; 5 – нониус с 10-ю делениями; 6 – штанга с делениями; 7 – зажимной винт

Измерение наружного размера детали или образца выполняется в следующем порядке. Вначале следует отпустить зажимной винт 7

штангенциркуля, поместить образец между губками 2 и поджать их, двигая рамку 4. Затем зажать винт 7 и снять отсчет. Число целых миллиметров отсчитать на шкале штанги 6 по нулевому штриху нониуса 5, а число десятых единиц миллиметра определить по тому штриху нониуса 5, который точно совмещен с каким-либо штрихом шкалы 6. Затем отпустить зажимной винт 7 и снять штангенциркуль с детали или образца.

Для измерения внутреннего размера детали или образца (например, диаметра отверстия) поместить губки 3 внутри отверстия (полости) и повторить вышеописанные операции.

## **1.2. Приборы механического принципа действия для измерения деформаций**

**1.2.1. Общие понятия.** Деформации твердых тел разделяют на два вида – линейные и угловые.

Линейные деформации тела характеризуются изменением взаимного расположения его точек, то есть перемещением точек тела относительно друг друга. Эти перемещения измеряют тензотрами, которые определяют изменение расстояния между точками на поверхности тела.

Угловые деформации характеризуют изменение угловых размеров тел и измеряются угломерами, в результате чего определяют угол поворота одного сечения относительно другого.

Расстояние между точками тела, изменение которого измеряют тензометром, называется базой прибора.

Для увеличения точности измерения при неоднородной деформации (когда линейные деформации в различных точках тела неодинаковые, например, при изгибе балки) следует выбирать приборы с малой базой – до 20 мм. При однородной деформации тела, например, при растяжении или сжатии стержня центрально приложенной нагрузкой, лучше применять приборы с большой базой.

Все тензотметры по принципу своего действия разделяются на три вида:

- механические с рычажной системой (рычажный тензотметр, стрелочный индикатор, прогибомеры и др.);
- оптико-механические (зеркальный тензотметр Мартенса);
- электрические.

**1.2.2. Стрелочный индикатор.** Стрелочный индикатор является измерительным прибором механического принципа действия.

Внешний вид и схема прибора приведены на рис. 2.

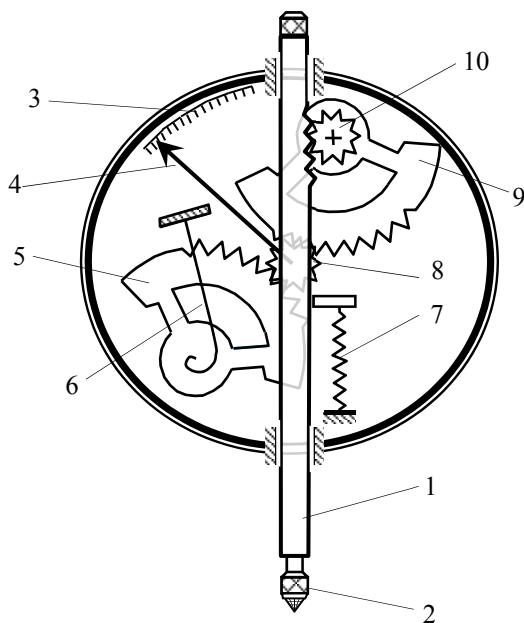


Рис. 2. Схема стрелочного индикатора с указанием его деталей:

- 1 – измерительный стержень; 2 – съемный наконечник; 3 – шкала прибора;  
4 – стрелка на шкале прибора; 5 – поджимная шестеренка; 6 – поджимная пружина шестеренок; 7 – поджимная пружина измерительного стержня; 8 – шестеренка на выходе; 9 – подающая шестеренка; 10 – принимающая шестеренка

Измерительный стержень индикатора связан со стрелкой зубчатой передачей, которая называется зубчато-реечным механизмом. Цена деления индикатора зависит от передаточного числа зубчато-реечного механизма. Наиболее часто применяют индикаторы с ценой деления 0,01 мм.

Для более точного измерения применяются индикаторы с ценой деления 0,002 и 0,001 мм. Максимальное перемещение измерительного стержня в различных конструкциях индикаторов, то есть их база измерения, может быть от 1 мм до 10 мм.

Для определения смещений точек конструкции, например, прогибов балок, индикатор крепится к неподвижной опоре таким образом, чтобы его измерительный стержень упирался в перемещающуюся поверхность. Для определения линейных деформаций при растяжении или сжатии стрелочный индикатор крепят в специальные кольца.

Деформации (удлинение либо укорочение базы измерения) вызывают перемещение измерительного стержня *1*. С помощью зубчатореечного механизма линейное перемещение измерительного стержня приводит к повороту малую шестеренку *10*. Так как малая шестеренка *10* и большая шестеренка *9* посажены на одну ось, то и большая шестеренка *9* будет поворачиваться на тот же угол. Малая шестеренка *8* сцеплена с большой шестеренкой *9*, поэтому ее поворот и поворот стрелки *4* будут значительно больше. За счет большого передаточного числа, которое зависит от отношения диаметров большой и малой шестеренок, малые линейные перемещения измерительного стержня *1* вызывают повороты на большие углы стрелки *4*. Этим отношением определяется и цена деления прибора.

**Цена деления прибора** по своему значению равна изменению измеряемой величины при изменении показания прибора на одну единицу. Например, если цена деления индикатора равна 0,01 мм, то это значит, что поворот большой стрелки прибора на одно деление будет соответствовать линейному смещению измерительного стержня на 0,01 мм. Цена деления должна быть всегда указана на шкале прибора.

### **1.3. Приборы для измерения деформаций электрического принципа действия**

**1.3.1. Общие понятия.** В настоящее время для измерения деформаций широко распространение получили электротензометрические методы. Измерение деформаций этими методами возможно благодаря тому, что деформация датчика вызывает изменение его некоторых параметров – сопротивления участка электрической цепи, емкости конденсатора или индуктивности электромагнитной катушки.

В измерительных приборах всегда присутствуют три части – датчик, усилитель и регистрирующее устройство (преобразователь). Элемент, прикрепленный к образцу, к конструкции, к детали маши-

ны или механизма и воспринимающий деформацию, называется **датчиком**. Сам датчик только вырабатывает сигнал, который поступает на усиливающее устройство. Так как носителем сигнала может быть сила тока, изменение емкости или индуктивности, что непосредственно не воспринимается и не регистрируется человеком, то после усиления сигнала он подается на преобразующее устройство. Преобразованный сигнал размещается на доступном для восприятия человеком носителе: индикации чисел, графике, звуковом или световом сигнале и др. В зависимости от того, какой электрический параметр датчика изменяется, различают датчики сопротивления, емкостные и индуктивные датчики.

Благодаря возможности дистанционного измерения особенно широкое распространение получили проволочные датчики. Их удобно применять для измерения деформаций не только при статических нагрузках и на неподвижных деталях, но и при динамических нагрузках, на быстро перемещающихся деталях, в труднодоступных местах.

Маленькие размеры проволочных датчиков позволяют размещать их на небольшой площади конструкции, что способствует более детальному изучению напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции.

По величине измеренных деформаций, используя закон Гука, вычисляют напряжения в соответствующих точках конструкции. Определение напряжения по измеренной деформации называют **тензометрированием**.

Проволочный датчик сопротивления представляет собой тонкую проволоку, изогнутую в виде плоских петель, наклеенную на полоску специальной бумаги или пленки. Датчик наклеивается на поверхность испытываемого объекта, что обеспечивает его совместную деформацию с деформацией поверхности детали или элемента конструкции. Проволока изготовлена из константанового сплава или из другого сплава (например, нихрома), имеющего большое омическое сопротивление. Диаметр проволоки составляет 0,02–0,03 мм.

При деформации датчика длина проволоки изменяется. Поэтому изменяется и омическое сопротивление датчика. По величине изменения сопротивления датчика определяется величина деформации. Чем длиннее проволока, тем больше изменяется ее сопротивление при одной и той же деформации. Поэтому для более точных измерений следует применять датчики из длинной проволоки. Однако

при увеличении длины проволоки будет увеличиваться и база измерения. Это не всегда приемлемо, особенно если деформации распределены неравномерно. Для уменьшения базы измерения и сохранения большой длины проволоки ее укладывают в виде петель. Все петли проволоки в электрической цепи будут являться последовательно соединенными проводниками. Поэтому их сопротивления в электрической цепи складываются.

Вследствие зигзагообразной укладки проволоки датчик будет реагировать на деформацию только по направлению длинных ветвей проволоки. Это направление называется **рабочим направлением датчика**.

Длина петли  $l_0$  является базой датчика. Для измерений деформаций обычно применяют датчики с базой 5, 10 и 20 мм. Для удобства припайки датчика к электропроводам выводные концы проволоки утолщены. Опытным путем установлено, что закон изменения сопротивления  $\Delta R$  прямо пропорционален относительной линейной деформации  $\varepsilon$ :

$$\Delta R = \varepsilon R \gamma, \quad (1)$$

где  $R$  – начальное сопротивление датчика, которое может быть от 100 до 250 Ом;

$\gamma$  – коэффициент чувствительности, зависящий от материала и базы датчика, может принимать значения от 1,8 до 2,1.

Из формулы (1) выражается линейная деформация  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \gamma}. \quad (2)$$

Величины  $\gamma$  и  $R$  для датчика постоянные, а величина  $\Delta R$  измеряется прибором. Изменения  $\Delta R$  очень мало и для его измерения должны применяться очень чувствительные регистрирующие устройства.

Для измерения деформаций, возникающих при действии статических нагрузок, применяют регистрирующие устройства с использованием электрических мостовых схем – с отсчетом по гальванометру (рис. 3) и с отсчетом по шкале балансирующего устройства (метод установки нуля) (рис. 5).

**1.3.2. Мостовая схема с отсчетом по гальванометру.** В процессе деформации конструкции, детали машины или образца изменяется сопротивление рабочего датчика  $R_p$ . Для определения этого изменения применяют равноплечный электрический мост (рис. 3). Рабочий датчик с сопротивлением  $R_p$ , наклеенный на поверхность конструкции, включается в одно плечо моста. Три другие плеча образуются сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$  и компенсирующим датчиком  $R_k$ , которые должны иметь сопротивление, равное сопротивлению рабочего датчика  $R_p$ . Все четыре сопротивления образуют уравновешенный мост, если разность потенциалов между узлами 1 и 3 будет равна нулю.

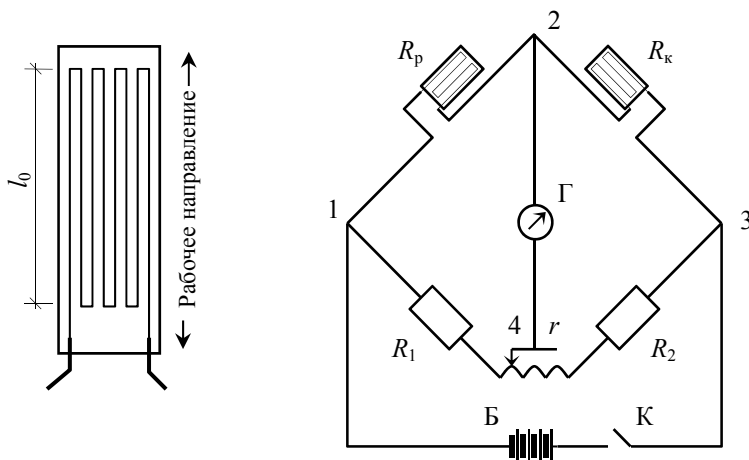


Рис. 3. Проволочный датчик сопротивления и мостовая схема с отсчетом по гальванометру:

К – ключ; Б – питание; Г – гальванометр;  $R_p$  – рабочий датчик;  $R_k$  – компенсирующий датчик;  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления;  $r$  – переменное сопротивление

Известно, что на электрическое сопротивление проводника оказывает влияние температура. Чем выше температура, тем больше «раскачиваются» атомы проводника (металлов) около своих штатных положений в кристаллической решетке и затрудняют направленное движение электронов. Вместе с тем дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению электрического сопротивления проводника. Это происходит потому, что тепловые колебания атомов становятся настолько большими, что их внешние электроны



покидают свои орбиты. Это насыщает проводник электронным газом, являющимся хорошим носителем заряда. Поэтому для переноса одного и того же заряда через сечение проводника электронам потребуется переместиться на гораздо меньшее расстояние по длине проводника. Сопротивление такому малому перемещению электронам кристаллическая решетка проводника оказывает гораздо меньшее.

Для компенсации влияния температуры на результаты измерения используется компенсирующий датчик. Рабочий и компенсирующий датчики должны быть в одинаковых температурных условиях. Поэтому компенсирующий датчик следует располагать вблизи рабочего датчика, но не наклеивать на поверхность конструкции, так как изменение его сопротивления должно вызываться только изменением температуры, а не деформацией конструкции. В этом случае изменение температуры одинаково сказывается на сопротивлении обоих датчиков, которые принадлежат разным ветвям электрического моста. Поэтому изменение температуры не нарушает его равновесия, то есть компенсируется датчиком  $R_k$ .

К узлам моста 1 и 3 подключается источник постоянного тока Б (батарея), а к ветви между узлами 2 и 4 – чувствительный электроизмерительный прибор Г (гальванометр), предназначенный для измерения силы тока, и переменное сопротивление  $r$  (потенциометр). Напряжение источника тока не должно превышать 8 В, чтобы исключить значительный нагрев датчиков.

Перед нагружением конструкции или детали следует произвести балансировку моста за счет изменения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , а также переменного сопротивления  $r$ . Иногда сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  служат датчики, наклеенные на поверхность с двух сторон консольной балки (рис. 4). Такая балка называется балансировочной. В этом случае регулировку сопротивлений производят деформацией балки. Если балка искривляется выпуклостью вверх, то ее верхние волокна удлиняются, а нижние укорачиваются. Поэтому датчик  $R_1$ , наклеенный к верхней поверхности балки, также удлиняется и его сопротивление увеличивается.

Датчик  $R_2$  наклеен на нижнюю поверхность балки. Поэтому он вместе с нижними волокнами балки укорачивается и его сопротивление уменьшается, и, напротив, если балка искривляется выпуклостью вниз, то сопротивление верхнего датчика  $R_1$  уменьшается, а нижнего  $R_2$  – увеличивается.

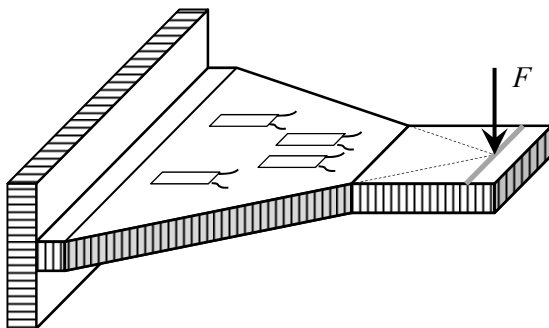


Рис. 4. Схема тарировочной балки

Если за счет деформации элемента конструкции или детали машины рабочий датчик изменит свое сопротивление, то баланс электрического моста нарушится из-за того, что сопротивления его ветвей не будут равными. Тогда между узлами 2 и 4 возникнет разность потенциалов, и в ветви 2–4 появится электрический ток, о чем будет свидетельствовать отклонение стрелки гальванометра от нулевого отсчета. Сила тока пропорциональна изменению сопротивления датчика  $R_p$ , а значит и величине произошедшей деформации. По отсчету на гальванометре и с учетом цены деления можно установить значение этой деформации.

Для выполнения измерений предварительно требуется установить цену деления гальванометра, выраженную через деформацию. Цену деления прибора определяют тарировкой. Основное уравнение проволочного тензоэффекта имеет вид:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{2} \frac{\Delta l}{l} = \frac{K}{2} \varepsilon, \quad (3)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление недеформированной проволоки;  
 $\Delta R$  – приращение сопротивления деформированной проволоки;  
 $K$  – чувствительность проволоки к деформации (коэффициент тензочувствительности);  
 $\varepsilon$  – относительная линейная деформация проволоки.

Изменение сопротивления датчика равно:

$$\Delta R = \alpha_0 \Delta n, \quad (4)$$

где  $\Delta R$  – изменение электрического сопротивления датчика;

$\alpha_0$  – цена деления гальванометра;

$\Delta n$  – изменение показания гальванометра.

Тогда зависимость деформации датчика от изменения показания гальванометра имеет вид:

$$\frac{\alpha_0 \Delta n}{R} = \frac{K}{2} \varepsilon \quad (5)$$

или

$$\varepsilon = \frac{2\alpha_0}{RK} \Delta n. \quad (6)$$

Отсюда следует, что датчики сопротивления характеризуются следующими параметрами: базой  $l_0$  ( $l_0 = 5 - 100$  мм); номинальным сопротивлением ( $R = 10 - 800$  Ом); наибольшим значением относительной линейной деформации, которую можно измерить датчиком ( $\varepsilon_{\max} = 0,3$  %); коэффициентом тензочувствительности ( $K = 1,9 - 2,1$ ).

Цена деления прибора также может быть найдена опытным способом при помощи тарировочной балки (рис. 4), которая за счет своей формы имеет определенную особенность: при нагружении в любой точке ее поверхности появляются одинаковые деформации.

На верхнюю и на нижнюю поверхность тарировочной балки наклеивают несколько датчиков и нагружают ее. Зная величину силы  $F$  и размеры балки, вычисляют относительные линейные деформации верхних и нижних волокон балки и снимают отсчеты по прибору. Цену деления прибора определяют делением приращения деформаций волокон балки  $\Delta \varepsilon$  на приращение показаний гальванометра  $\Delta n$ .

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta n}. \quad (7)$$

При тарировке обычно используется несколько датчиков из партии, чтобы исключить случайные погрешности и учесть статистический разброс.

**1.3.3. Мостовая схема с отсчетом по нулевому методу (метод установки нуля).** Принципиальная электрическая схема измерения деформаций с установкой нуля (рис. 5) существенно не отличается от схемы измерения деформаций с отсчетом по гальванометру (рис. 3).

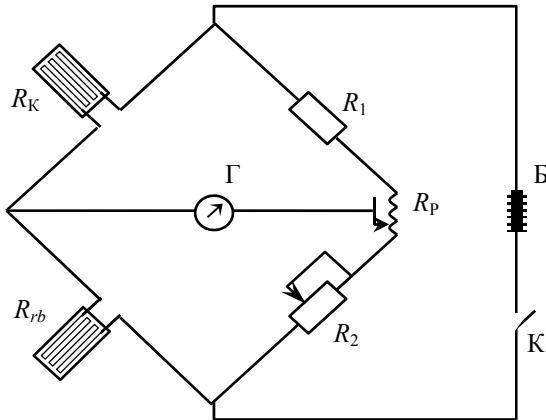


Рис. 5. Мостовая схема с отсчетом по нулевому методу:  
 $R_{rb}$  – рабочий датчик;  $R_K$  – компенсирующий датчик;  $R_p$  – реохорда;  
 $R_1$  – сопротивление;  $R_2$  – переменное сопротивление;  $\Gamma$  – гальванометр;  
 $K$  – переключатель;  $B$  – источник питания

Отличие заключается лишь в способе балансировки моста. После нагружения испытываемой конструкции за счет изменения сопротивления датчика произойдет разбалансировка электрического моста, и стрелка гальванометра отклонится от нулевой отметки.

Возврат к равновесному состоянию моста может быть достигнут поворотом рукоятки реохорда и изменением сопротивления  $R_p$ . О величине деформации датчика судят по числу делений, на которое потребовалось повернуть ручку реохорда. То есть в этом случае отсчет снимают не с показаний гальванометра, а со шкалы реохорда.

Нулевой метод измерения точнее, чем метод отсчета по гальванометру, так как в момент снятия отсчета мост сбалансирован и через гальванометр ток не проходит. Поэтому показания не будут зависеть от колебания напряжений источника тока и сопротивления гальванометра.

## 2. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Для изучения свойств материалов и определения их механических характеристик выполняется испытание образцов. Испытания производят при нагрузках следующих видов: статической, ударной и циклической (испытание на усталость или выносливость).

По виду деформаций (сопротивлений) различают испытания на растяжение, сжатие, срез (сдвиг) и кручение.

Так как результаты испытания зависят от формы и размеров образца, скорости нагружения, температуры и пр., то эксперимент обычно проводят при условиях, предусмотренных стандартами.

При статических нагрузках требуется выполнить не менее двух испытаний на идентичных образцах, при динамических нагрузках – не менее 3-х испытаний, при переменных нагрузках – не менее 10-ти испытаний.

## 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Механические характеристики материалов делятся на две группы: прочности и пластичности.

### 3.1. Механические характеристики прочности

**3.1.1. Закон Гука.** Экспериментально установлено, что для некоторых материалов до некоторого предела деформация является упругой и прямо пропорциональной напряжению. Закон Гука выполняется для малоуглеродистой (строительной) стали и «железного уса» (кристаллов железа, полученных из растворов его солей). Для других материалов закон Гука строго не выполняется, но зависимость между деформацией и напряжением близка к линейной. Поэтому для упрощения расчета полагают, что закон Гука выполняется.

**3.1.2. Предел пропорциональности** – это механическая характеристика прочности, равная максимальному напряжению, до которого еще справедлив закон Гука:

$$\sigma_{pr} = \frac{N_{pr}}{A_0}, \text{ МПа}, \quad (8)$$

где  $N_{pr}$  – продольная сила, соответствующая пределу пропорциональности, которая определяется по машинной диаграмме испытания;

$A_0$  – площадь поперечного сечения образца до испытания.

**3.1.2. Предел текучести** – это механическая характеристика прочности, равная напряжению, при котором происходят большие деформации без заметного изменения нагрузки:

$$\sigma_y = \frac{N_y}{A_0}, \text{ МПа}, \quad (9)$$

где  $N_y$  – нагрузка, соответствующая пределу текучести, которая определяется по машинной диаграмме испытания.

**3.1.3. Предел прочности** – это механическая характеристика прочности, равная отношению максимальной нагрузки, которую способен выдержать образец, к первоначальной площади его поперечного сечения:

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0}, \text{ МПа}, \quad (10)$$

где  $N_u$  – максимальная нагрузка, которую выдерживает образец, определяемая по машинной диаграмме испытания образца.

## 3.2. Механические характеристики пластичности

**3.2.1. Относительное остаточное удлинение** – это механическая характеристика пластичности, численно равная отношению остаточного удлинения образца к его первоначальной длине, взятому в процентах

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100, \%, \quad (11)$$

где  $l_r$  – длина рабочей части образца после испытания, которая определяется измерением;

$l_0$  – длина рабочей части образца до испытания, которая определяется измерением.

**3.2.2. Относительное остаточное сужение** – это механическая характеристика пластичности, численно равная отношению (в процентах) изменения площади поперечного сечения до и после разрыва к площади поперечного сечения образца до испытания:

$$\chi = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100, \% \quad (12)$$

где  $A_r$ ,  $A_0$  – площади поперечного сечения образца после разрыва и до испытания, которые определяются по диаметрам образца, измененным в месте образования «шейки».

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad A_r = \frac{\pi d_r^2}{4}. \quad (13)$$

**3.2.3. Удельная работа** – это механическая характеристика пластичности, численно равная работе, затраченной испытательной машиной на разрыв образца, отнесенной к его объему:

$$a = \eta \frac{N_U \Delta l_0}{V_0}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \quad (14)$$

где  $\eta$  – коэффициент полноты диаграммы (отношение площади, описанной машинной диаграммой, к площади описывающего ее прямоугольника), принимаемый для малоуглеродистой стали равным 0,8;

$V_0$  – объем рабочей части образца, равный:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot l_0. \quad (15)$$

### 3.3. Основные механические характеристики некоторых материалов

Таблица 1

#### Механические характеристики материалов

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Остаточное удлинение, %	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
<b>С т а л ь</b>					
Ст2	320–400	190–220	28	196–206	0,3
Ст3	380–470	210–240	21–23	196–206	0,3
<b>Ч у г у н с е р ы й</b>					
СЧ21-40	210	158	–	85	0,23–0,27
СЧ35-56	350	298	–	145	0,23–0,27
<b>Ч у г у н к о в к и й</b>					
КЧ30-8	300	190	6	155	0,23
КЧ37-12	370	230	12	198	0,36
<b>А л ю м и н и е в ы е с п л а в ы</b>					
АМцМ	130	50	23	71	0,30
АМг6М	300	150	18	71	0,31
<b>Д р у г и е м а т е р и а л ы</b>					
Каучук	16–38	–	600–700	$0,6 \cdot 10^{-7}$	0,47
Стекло	30–90	–	–	48–75	0,18–0,32
Бетон	5–48	–	–	14,6–23,2	0,16–0,18
Сосна	9,31–11,5	61	–	10,2–14,5	0,49
Дуб	128,8	74	–	7,8–15,1	0,43



## Часть II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### Лабораторная работа № 1

#### ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытания на растяжение являются основным и наиболее распространенным методом исследования и контроля механических свойств материалов. При проектировании конструкций, машин и механизмов необходимо знать значения величин, характеризующих прочностные и деформативные свойства материалов.

#### Цель испытания

Целью испытания на растяжение образца из малоуглеродистой стали является изучение зависимости между деформацией образца и растягивающей силой, определение механических характеристик.

#### Исходные данные

**Требования к испытанию.** Испытание следует проводить в соответствии с действующими стандартами, устанавливающими требования для испытаний на статические нагрузки. Температура образца должна быть от +10 до +25 °С, скорость подачи деформации 1 мм/мин, разрыв в пределах рабочей части образца. Поверхность образца отшлифована и отполирована до зеркального блеска.

**Испытательная машина.** Для испытания используется разрывная машина.

**Измерительные приборы и инструменты.** Для выполнения измерений размеров образца используются стальная линейка и штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

**Форма и размеры испытываемого образца.** При испытании на растяжение форма и размеры образца могут быть совершенно разными – прямоугольного и круглого поперечного сечения, с утолщениями и без утолщения по концам. Форма и размеры образца зависят от того, из чего он изготовлен.

Образцы диаметром 20 мм называют нормальными, а образцы с меньшим диаметром (иногда большим) или образцы некруглого

поперечного сечения – пропорциональными. Рабочая (расчетная) часть образца располагается в его средней части и отмечается записями или кернами (вмятинами). Образцы с отношением длины рабочей части к диаметру равным десяти называют длинными или десятикратными, а при отношении равном пяти – короткими или пятикратными.

В соответствии со стандартом основным (базовым) образцом для испытания металлов на растяжение является нормальный десятикратный образец диаметром 20 мм и длиной рабочей части равной 200 мм. Для обеспечения надежного захвата при испытании на концах образца должны быть утолщения с плавным переходом от меньшего диаметра к большему (рис. 6).

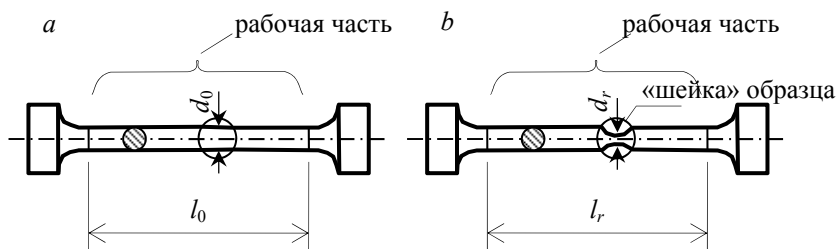


Рис. 6. Вид образца до испытания (а) и после испытания (б)

### Диаграмма испытания образца из малоуглеродистой стали

Испытание на растяжение проводится на специальной разрывной машине. В результате испытания записывается диаграмма растяжения. Для малоуглеродистой стали эта диаграмма при испытании на растяжение имеет вид, показанный на рис. 7.

**Участок диаграммы, соответствующий действию закона Гука.** На участке диаграммы, отмеченной точками 0 и 1, деформации образца растут прямо пропорционально растягивающей силе. Следовательно, при таких нагрузках образец деформируется по закону Гука.

Если образец разгрузить на этой стадии испытания, то диаграмма разгрузки повторит уже имеющуюся часть диаграммы. То есть полная разгрузка образца приведет к восстановлению его первоначальной формы.

чальных размеров и формы. Это указывает на то, что деформации образца на этой стадии испытания являются упругими.

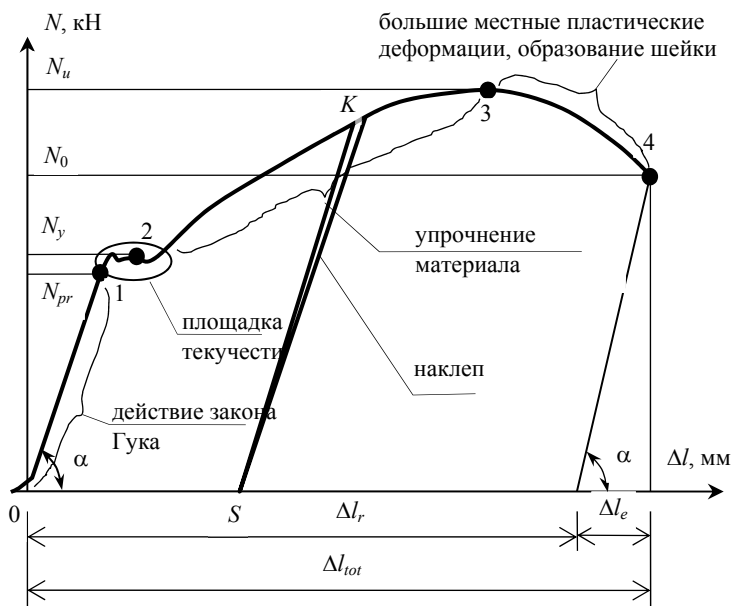


Рис. 7. Машинная диаграмма испытания образца из малоуглеродистой стали на растяжение

**Площадка текучести и линии Людерса–Чернова.** Если нагрузка вышла за пределы участка диаграммы, ограниченного точками 0 и 1, и продолжает увеличиваться, то наступает такой момент, соответствующий точке 2, когда деформации начинают расти практически без увеличения нагрузки. Горизонтальный участок диаграммы в окрестности точки 2 называют площадкой текучести. Как показывают многочисленные исследования образцов из стали, текучесть сопровождается значительными взаимными сдвигами кристаллов по площадкам, наклоненным к оси образца под углом  $45^\circ$ , в результате чего на поверхности образуются складки. Это становится заметным невооруженным глазом, если поверхность образца отполирована до «зеркального блеска». После образования таких складок зеркальная поверхность становится матовой. В честь ученых,

обнаруживших это явление, эти складки названы линиями Людерса–Чернова (рис. 8).



Рис. 8. Образование линий Людерса–Чернова

**Упрочнение стали и наклеп.** Удлинившись на некоторую величину при постоянной нагрузке, то есть претерпев состояние текучести, сталь снова приобретает способность к увеличению сопротивления, дальнейшему растяжению, и диаграмма за площадкой текучести поднимается вверх, но по более пологой кривой. Участок диаграммы, ограниченный концом площадки текучести и точкой 3, соответствующей наибольшей нагрузке на образец, называется участком упрочнения стали.

Если в момент испытания, соответствующий точке  $K$ , остановить нагружение образца, а затем медленно его разгружать, можно получить диаграмму в виде прямой линии, ограниченной точками  $K$  и  $S$  и параллельную прямой участка между точками 0 и 1. Если после разгрузки начать снова нагружать образец, то получим прямую  $SK$ , и далее – недостающую часть диаграммы  $K4$ . Такое явление называется наклепом.

**Наклеп** – это явление увеличения предела пропорциональности материала при повторных нагружениях.

**Участок больших местных деформаций и образования «шейки».** Участок диаграммы, ограниченный точками 3 и 4, соответствует появлению больших местных пластических деформаций образца, приводящих к образованию «шейки». Площадь поперечного сечения образца в «шейке» быстро уменьшается, что уменьшает сопротивление образца растяжению. Так как разрывная машина поддерживает скорость деформации образца постоянной, наблюдается быстрое снижение нагрузки. В какой-то момент испытания происходит

разрыв образца с разделением его на две части, что соответствует точке 4 на диаграмме.

**Полная, остаточная и упругая деформации образца.** Деформация образца в момент разрыва называется полной  $\Delta l_{tot}$  и складывается из двух составляющих: упругой деформации  $\Delta l_e$  и остаточной (пластической) деформации  $\Delta l_r$ . Полная деформация непосредственно измерена быть не может, она устанавливается по машинной диаграмме с учетом масштаба. После разрыва образца упругая деформация  $\Delta l_e$  исчезает, а пластическая  $\Delta l_r$  остается. Для определения остаточной (пластической) деформации необходимо измерить длину рабочей части образца после разрыва и вычесть его длину до испытания образца:

$$\Delta l_r = l_r - l_0. \quad (16)$$

Упругая деформация может быть найдена как разность полной деформации и остаточной:

$$\Delta l_e = \Delta l_{tot} - \Delta l_r. \quad (17)$$

### **Диаграммы истинных и условных напряжений при испытании образца на растяжение**

Для того чтобы исключить влияние размеров образца (площади поперечного сечения и его длины) на результаты испытания, строят диаграмму условных и истинных напряжений (рис. 9).

Предварительно определяют механические характеристики стали – пределы пропорциональности, текучести и прочности, а также условные и истинные напряжения в момент разрыва образца. Затем по масштабу определяют абсолютные деформации образца, соответствующие отмеченным на машинной диаграмме четырем точкам, и делят их на первоначальную длину его рабочей части. Используя полученные величины в осях координат  $\sigma$  и  $\varepsilon$ , наносят четыре точки, соблюдая масштаб, и соединяют их кривой.

В процессе испытания площадь поперечного сечения образца будет уменьшаться незначительно до точки 3, поэтому она не учитывается в расчетах. На участке, ограниченном точками 3 и 4, за счет

больших местных деформаций площадь сечения шейки будет значительно уменьшаться, что приведет к росту истинных напряжений (рис. 9). Поэтому при построении истинной диаграммы напряжений ордината четвертой точки (точки со штрихом) значительно больше ординаты четвертой точки диаграммы условных напряжений.

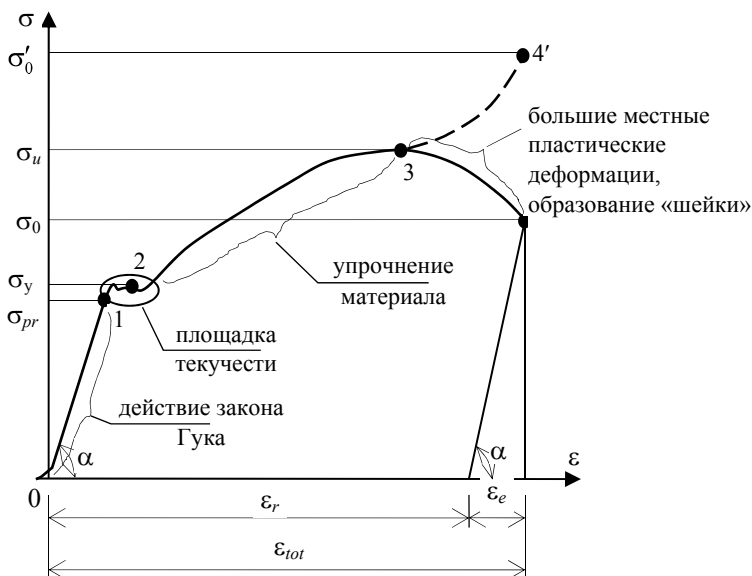


Рис. 9. Диаграмма истинных и условных напряжений образца из малоуглеродистой стали при испытании на растяжение

## Порядок выполнения испытания и обработка результатов

### *Порядок проведения испытания:*

1. Ознакомиться с устройством испытательной машины и ее принципиальной схемой действия.
2. Измерить до испытания диаметр и длину рабочей части образца, отмеченной кернами,
3. Установить образец в захваты испытательной машины.
4. Включить испытательную машину и наблюдать за процессом растяжения образца – получение прямолинейного участка диаграмм-

мы, площадки текучести, области упрочнения; уменьшение нагрузки; образование шейки на образце и его разрушение.

5. После разрушения образца выключить испытательную машину, освободить из захватов части разрушенного образца.

6. Приступить к обработке результатов и оформлению отчета по лабораторной работе.

**Обработка результатов испытания и оформление отчета.**  
Полученные результаты испытания образца обработать в следующем порядке.

1. Сложить обе части разрушенного образца так, чтобы керны (вмятины) располагались на одной прямой, и измерить расстояние между ними  $l_r$ .

2. Измерить диаметр шейки (самого узкого места) образца по двум взаимно перпендикулярным направлениям  $d_{r1}$  и  $d_{r2}$  и определить среднее значение:

$$d_r = \frac{d_{r1} + d_{r2}}{2}. \quad (19)$$

3. Вычислить площадь сечения образца в месте образования шейки:

$$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4}. \quad (20)$$

4. Следует учесть, что при малых нагрузках диаграмма обычно является криволинейной, что связано с деформациями смятия в местах захвата пресса. На машинной диаграмме растяжения провести горизонтальную ось  $\Delta l$  так, чтобы она была касательной к диаграмме снизу. Затем продлить прямолинейную часть диаграммы вниз так, чтобы она пересекла горизонтальную ось  $\Delta l$ . Выбрать эту точку пересечения как начало координат и провести через нее вертикальную ось  $N$  вверх.

5. Отметить конец прямолинейного участка диаграммы точкой 1, середину площадки текучести точкой 2, самую верхнюю точку диаграммы точкой 3 и конец диаграммы, соответствующий разрушению образца, точкой 4. Учитывая масштаб построения диаграммы,

определить координаты отмеченных четырех точек, которые будут соответствовать по вертикальному направлению силам  $N_{pr}$ ,  $N_y$ ,  $N_u$  и  $N_0$ , а по горизонтальному направлению деформациям  $\Delta l_{pr}$ ,  $\Delta l_y$ ,  $\Delta l_u$  и  $\Delta l_0$ .

6. По полученным данным определить механические характеристики стали:

– предел пропорциональности:

$$\sigma_{pr} = N_{pr} / A_0; \quad (21)$$

– предел текучести:

$$\sigma_y = N_y / A_0; \quad (22)$$

– предел прочности:

$$\sigma_u = N_u / A_0; \quad (23)$$

– условное напряжение разрыва образца:

$$\sigma_0 = N_0 / A_0; \quad (24)$$

– истинное напряжение разрыва образца:

$$\sigma'_0 = N_0 / A_r; \quad (25)$$

– относительное остаточное удлинение образца:

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100, \%; \quad (26)$$

– относительное остаточное сужение образца:

$$\chi = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100, \%. \quad (27)$$



7. Определить относительные линейные деформации, соответствующие пределам пропорциональности, текучести, прочности и моменту разрыва образца:

$$\varepsilon_{pr} = \Delta l_{pr} / l_0; \quad \varepsilon_y = \Delta l_y / l_0; \quad \varepsilon_u = \Delta l_u / l_0; \quad \varepsilon_0 = \Delta l_0 / l_0. \quad (28)$$

8. Построить диаграмму напряжений. Для этого изобразить ось относительных линейных деформаций  $\varepsilon$  и ось напряжений  $\sigma$ . Далее, используя значения механических характеристик стали и соответствующие им относительные деформации, нанести на график четыре точки и соединить их линией, подобной линии, изображающей полученную диаграмму испытания на растяжение стального образца в координатах  $N - \Delta l$ .

9. Используя полученные механические характеристики, определить допускаемое напряжение для исследуемой стали, приняв коэффициент запаса прочности  $n = 1,5$ .

10. Проанализировать полученные результаты испытания и сделать вывод.

11. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета приведен в приложении.

## **Лабораторная работа № 2**

### **ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ**

Элементы машин (механизмов) могут испытывать сжатие. Прочность материалов оценивается по результатам испытания их на сжатие. Испытание на сжатие является основным при определении механических характеристик хрупких материалов.

При испытании на сжатие пластических материалов из-за большой деформации (их «сплющивания») удастся определить лишь предел текучести. Пластические материалы при испытании на сжатие практически не могут быть разрушены. Поэтому для них невозможно определить предел прочности при сжатии. Хрупкие материалы (чугун, камень, бетон и др.) разрушаются при сжатии, выдерживая при этом значительно большее напряжение, чем при растяжении. Для хрупких материалов предел прочности на сжатие имеет

большое практическое значение. Тем более что хрупкие материалы в конструкциях обычно работают на сжатие.

### Цель испытания

Целью испытания на сжатие является изучение опытных зависимостей между сжимающей силой и деформацией образцов из стали, чугуна и древесины. По полученным результатам испытания требуется определить механические характеристики прочности и пластичности материалов. Для хрупких материалов установить допустимое напряжение.

### Исходные данные

**Требования к испытанию.** Нагружение образцов выполняется статической нагрузкой при скорости деформирования не более 1 мм/мин. Опорные поверхности образцов должны быть гладкими, а форма и размеры образца – соответствовать стандарту. Наличие трения между торцами образца и плитами пресса приводит к увеличению разброса результатов испытания. В некоторых случаях для устранения влияния трения опорные поверхности (торцы) образцов шлифуют и смазывают графитовой пастой.

**Испытательная машина.** Испытание проводится на гидравлическом прессе с построением диаграммы сжатия в координатах  $N - \Delta l$ .

**Измерительные приборы и инструменты.** Для определения размеров образца до испытания и после испытания используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

**Форма и размеры испытываемых образцов на сжатие.** Стальной образец имеет форму цилиндра диаметром 20 мм и высотой 20 мм. При изготовлении образцов для испытания на сжатие для исключения потери устойчивости высота образца не должна превышать три диаметра.

Цилиндрический образец из чугуна может иметь такие же размеры, что и стальной или иметь форму кубика с размером ребра 20 или 10 мм.

Древесина испытывается на сжатие вдоль и поперек волокон. Образец для испытания древесины вдоль волокон должен иметь форму параллелепипеда с отношением высоты к ширине равным полтора.

## Диаграммы испытания образцов из пластических и хрупких материалов

### *Диаграмма сжатия и форма разрушения стального образца.*

На начальном этапе испытания диаграмма имеет прямолинейный вид, что подтверждает соблюдение закона Гука (рис. 10). Затем следует площадка текучести. Нарастание пластических деформаций при постоянной сжимающей нагрузке заканчивается, и диаграмма становится криволинейной. Для дальнейшей деформации образца опять требуется увеличение нагрузки. При этом образец становится заметно короче и при отсутствии смазки приобретает бочкообразную форму. Но добиться разрушения стального образца при испытании на сжатие невозможно, так как по мере роста нагрузки увеличивается площадь его поперечного сечения, а значит и сопротивление. Поэтому установить на диаграмме точку, соответствующую пределу прочности невозможно.

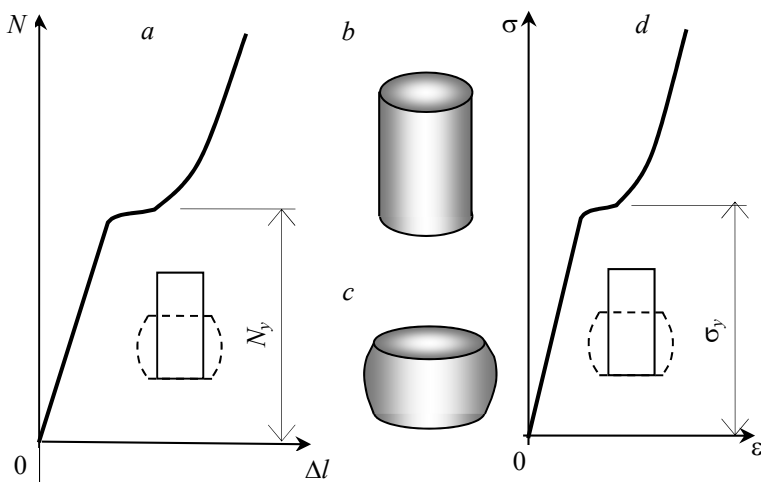


Рис. 10. Машинная диаграмма (а), вид стального образца до испытания (b) и после испытания (с) и диаграмма напряжений (d)

### *Диаграмма сжатия и форма разрушения чугунного образца.*

Диаграмма сжатия чугунного образца имеет выраженный криволинейный характер (рис. 11).

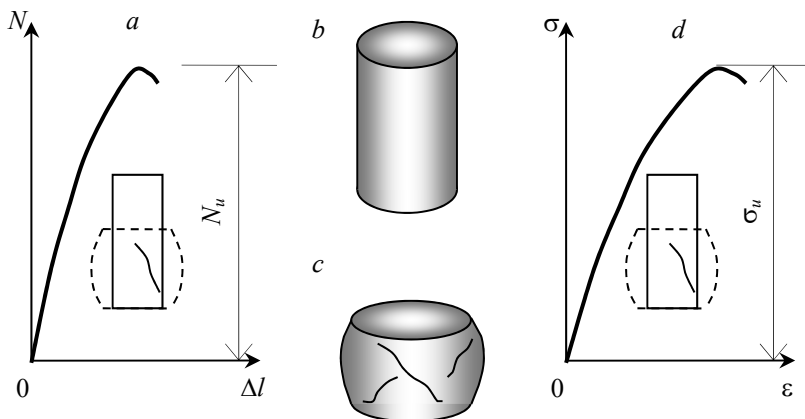


Рис. 11. Машинная диаграмма (а), вид чугунного образца до испытания (b), после испытания (с) и диаграмма напряжений (d)

Поэтому для чугуна закон Гука может быть применен только приближенно. Значение модуля упругости является усредненной величиной. Площадка текучести на диаграмме отсутствует. При разрушении чугунного образца на его боковой поверхности образуются трещины, расположенные под углом  $45^\circ$  к оси. Разрушение чугунного образца происходит в момент образования первой трещины на его поверхности, что соответствует максимальной сжимающей нагрузке и резкому обрыву диаграммы. Этот момент установить сложно, поэтому в результате испытания образец всегда оказывается «пережатым». Максимальная сжимающая сила на диаграмме соответствует усилию предела прочности  $N_u$ . Дальнейшее деформирование образца приводит к появлению на его поверхности новых трещин и выкрашиванию частиц чугуна.

***Диаграмма сжатия и форма разрушения деревянного образца.***

В связи с волокнистым строением древесины ее прочность и модуль упругости вдоль и поперек волокон неодинаковые. Поэтому древесина имеет анизотропию по прочности и по жесткости (рис. 12).

Диаграммы деформирования деревянного образца на сжатие вдоль волокна (1) и на сжатие поперек волокна (2) существенно отличаются друг от друга (рис. 12). Диаграмма, полученная при испытании образца на сжатие вдоль волокна (1), представляет собой за-

висимость, близкую к прямолинейной. Лишь в конце испытания наблюдается уменьшение нагрузки. Максимальная сжимающая сила на диаграмме соответствует усилию предела прочности. В момент разрушения в образце за счет сдвигов образуются трещины, расположенные под углом  $45^\circ$  к линии действия силы.

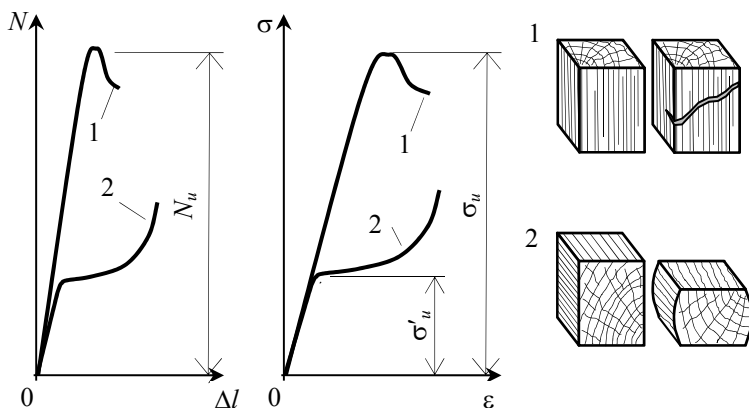


Рис. 12. Машинная диаграмма (а), диаграмма напряжений (б) и вид деревянного образца (с) при испытании на сжатие вдоль волокна (1) и поперек волокна (2)

Диаграмма, полученная при испытании деревянного образца на сжатие поперек волокон (2), также вначале является прямой. В древесине чередуются более прочные и менее прочные волокна (годовые кольца). При достижении некоторого значения сжимающей силы начинают разрушаться менее прочные волокна, что вызывает большие деформации образца. Поэтому диаграмма становится полой (почти горизонтальной). Когда все малопрочные волокна будут разрушены и уплотнятся, сопротивление образца сжатию будет возрастать неограниченно.

### Порядок проведения испытания и обработка результатов

Порядок проведения испытания образцов из стали, чугуна и древесины практически одинаковые.

### ***Порядок проведения испытания:***

1. Ознакомиться с устройством испытательной машины и ее принципиальной схемой действия.
2. До испытания измерить высоту и диаметр для стального и чугунного образца, высоту и размеры квадратного сечения для деревянного образца.
3. Установить образец между плитами испытательной машины. При испытании древесины на сжатие вдоль волокна линия действия силы должна быть параллельна волокнам в образце. Если испытание древесины проводится поперек волокна, то образец следует установить так, чтобы линия действия силы была перпендикулярна волокнам.
4. Включить испытательную машину (пресс) и наблюдать за процессом сжатия образца: получением прямолинейного участка диаграммы, площадки текучести, области упрочнения, образованием трещин и разрушением образца.
5. После разрушения образца выключить испытательную машину (пресс), вынуть из захватов образец, изучить форму образца и образованные трещины. Измерить размеры образца после испытания.
6. Приступить к обработке результатов и оформлению отчета по лабораторной работе.

### ***Обработка результатов испытания и оформление отчета.***

1. После испытания чугунного и деревянного образцов определить значение усилий, соответствующее пределу прочности. Для образца из стали установить силу, соответствующую пределу текучести и максимальное усилие, достигнутое при испытании.
2. Осмотреть образцы до испытания и после испытания, нарисовать их и имеющиеся на них трещины, измерить высоту, диаметр для чугунного и стального образцов и стороны сечения деревянного образца.
3. По опытным данным перечертить диаграммы сжатия для стали, чугуна и древесины в журнал лабораторных работ.
4. Для хрупких материалов (чугуна и древесины) определить пределы прочности и относительные остаточные укорочения:

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0}, \quad \varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_r} \cdot 100, \quad (29)$$

где  $N_u$  – силы, соответствующие пределу прочности чугуна и древесины;

$h_r$  – высота чугунного и деревянного образцов после испытания;

$h_0$  – высота чугунного и деревянного образцов до испытания;

$A_0$  – площадь поперечного сечения чугунного и деревянного образцов до испытания.

5. Для упруго-пластического материала (стали) определить предел текучести, максимальное условное напряжение и относительное остаточное укорочение при максимальной нагрузке испытания:

$$\sigma_y = \frac{N_y}{A_0}, \quad \sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0}, \quad \varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \cdot 100, \quad (30)$$

где  $N_y$  – сила, соответствующая пределу текучести стали;

$N_{\max}$  – максимальная сила испытания стали;

$h_r$  – высота стального образцов после испытания;

$h_0$  – высота стального образца до испытания;

$A_0$  – площадь поперечного сечения стального образца до испытания.

6. Для чугуна и стали определить допускаемые напряжения, приняв для стали коэффициент запаса прочности  $n = 1,5$ , а для чугуна  $n = 3$ :

$$[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n}, \quad (31)$$

где  $\sigma^0$  – опасное напряжение,  $\sigma^0 = \sigma_y$  для стали и  $\sigma^0 = \sigma_u$  для чугуна.

7. Проанализировать полученные результаты испытания и сделать вывод.

8. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в приложении.

### Лабораторная работа № 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Физическая постоянная  $E$  называется модулем упругости (модулем Юнга) и является коэффициентом зависимости, выражающей закон Гука  $\sigma = E\varepsilon$ . Модуль упругости характеризует жесткость материала – его способность сопротивляться упругому деформированию. Величина модуля упругости зависит от свойств материала и может быть определена только опытным способом.

Под действием осевой силы стержень изменяет свою длину – удлиняется или укорачивается, и изменяет свои поперечные размеры. Способность материала деформироваться в поперечном направлении (направлении перпендикулярном к линии действия силы) характеризуется коэффициентом поперечной деформации  $\nu$  (коэффициентом Пуассона). Отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации, взятое по абсолютной величине, называется коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом Пуассона). Коэффициент Пуассона для изотропных материалов может принимать значения в пределах от 0 до 0,5. Этот физический коэффициент зависит от свойств материала и, так же как модуль упругости, может быть найден только опытным путем.

Важным допущением в сопротивлении материалов является предположение о прямой пропорциональности деформаций и напряжений (закон Гука) и гипотеза Бернулли – плоские поперечные сечения до деформации остаются плоскими и после деформации. Прямо пропорциональная зависимость деформаций и напряжений достаточно точно выполняется только для малоуглеродистых сталей и «железного уса» – кристаллов железа, выращенных из растворов солей железа. Причиной этому является малое содержание дефектов кристаллической решетки этих материалов. Большое количество дефектов кристаллической решетки и присутствие примесей других материалов объясняет криволинейность диаграмм испытания. Гипотеза Бернулли справедлива только в отдельных случаях сопротивления стержня: центральное растяжение-сжатие длинных стержней, чистый изгиб тонких балок и др.



## Цель испытания

По результатам испытания подтвердить справедливость закона Гука для малоуглеродистой стали и гипотезу Бернулли; определить опытным путем значение модуля упругости и коэффициент Пуассона.

## Исходные данные

**Требования к испытанию.** Растяжение образца должно выполняться статической нагрузкой со скоростью деформирования не более 1 мм/мин, равными ступенями при отсутствии перекосов положения образца – линия действия растягивающей силы должна точно совпадать с осью стержня (образца). Напряжения, вызванные максимальной нагрузкой на образец, не должны превышать предел пропорциональности  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$ .

**Испытательная машина.** Для проведения опыта использована разрывная машина.

**Измерительные приборы и инструменты.** Для определения размеров поперечного сечения используются штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм и стальная линейка. Деформации продольных и поперечных волокон измерялись с помощью датчиков сопротивления с базой  $l_0 = 20$  мм и цифровым измерителем деформации. Цена деления прибора указана на шкале и равна  $\alpha = 10^{-5}$ , значение коэффициента чувствительности  $K = 2,05$  указано в паспорте прибора.

**Датчики и используемый образец.** Испытание проводится на стальном образце прямоугольного сечения (рис. 13). На широкой грани образца наклеены семь датчиков, пять из которых с рабочим направлением вдоль действия растягивающей силы. Эти датчики используются для измерения деформаций продольных волокон. Два датчика из семи наклеены так, что их рабочее направление перпендикулярно направлению силы. Они используются для измерения деформаций поперечных волокон.

Датчик, компенсирующий влияние температуры, наклеен на недеформированную деталь установки – пластинку электроразъема. Все датчики должны быть наклеены на тщательно зачищенную, обезжиренную поверхность и качественно припаяны к проводам прибора.

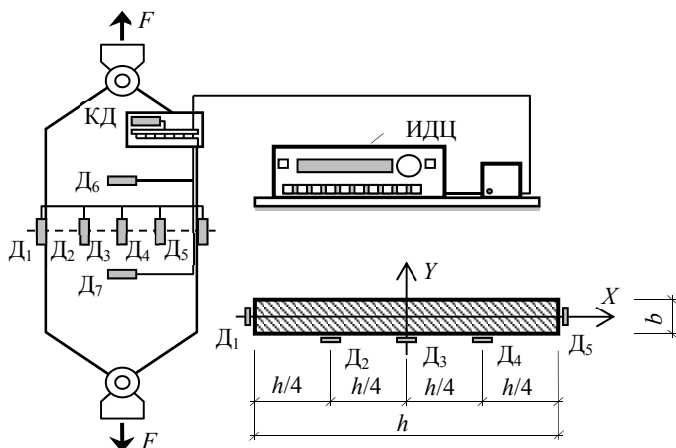


Рис. 13. Схема образца с датчиками и подключенным прибором ИДЦ

### Порядок проведения испытания и обработка результатов

#### **Порядок проведения испытания:**

1. Ознакомиться с основными узлами и принципом работы испытательной машины.
2. Ознакомиться с образцом, узлами его крепления и наклеенными на него датчиками.
3. Установить, какие датчики являются рабочими, какие из них предназначены для измерения деформаций в продольном направлении, а какие для измерения поперечных деформаций.
4. Установить, какой датчик является компенсирующим, и определить место его расположения.
5. Ознакомиться с работой измерителя деформации.
6. Произвести предварительное нагружение для обжатия головок образца в захватах испытательной машины, зафиксировать величину нагрузки и произвести первый отсчет по всем семи датчикам.
7. Нагрузить образец ступенями, последовательно снять отсчеты по каждому из семи датчиков и записать их в журнал.
8. После завершения испытания разгрузить образец.

**Заполнение таблицы результатов испытания.** По мере проведения испытаний в таблицу необходимо занести отсчеты по нагруз-

ке  $N$  и показания прибора по каждому из семи датчиков  $n$ . Далее следует определить приращения нагрузки  $\Delta N$  и показаний прибора  $\Delta l$  на каждой ступени нагружения для каждого датчика. Для этого из последующего отсчета необходимо вычесть предыдущий отсчет и записать результат в позицию, расположенную между строками соответствующих нагрузок. Затем по приращениям нагрузки и показаниям прибора, соответствующих каждому датчику, вычислить средние арифметические значения приращений, которые записываются в нижней позиции соответствующего столбца таблицы.

**Построение графиков деформации.** Для подтверждения закона Гука следует построить графики зависимостей продольных и поперечных деформаций от нагрузки. Для этого необходимо выбрать один датчик (например, третий) из первых пяти и шестой или седьмой датчик. Так как отсчеты  $n$  пропорциональны  $\varepsilon$ , график деформаций можно построить, используя значения отсчетов  $n$  и значения нагрузки  $N$ .

Поместить первую точку графика в начале системы координатных осей  $n$  и  $N$ . Отложить от нуля на горизонтальной оси приращение  $\Delta l$ , соответствующее первой ступени нагружения, а на вертикальной оси  $\Delta N$ , соответствующее приращению нагрузки, и отметить точку с полученными координатами. Затем от полученных координат второй точки отложить  $\Delta l$ , соответствующее второй ступени нагружения, и  $\Delta N$ , соответствующее приращению нагрузки. Получить координаты третьей точки и так далее. Соединяя полученные точки штриховыми прямыми, построить ломаную линию. Далее провести прямую через полученные точки так, чтобы отклонение этих точек от проведенной прямой было бы минимальным (рис. 14). Следует обратить внимание на то, что график, полученный по данным датчика с направлением вдоль линии силы, отклонен вправо от вертикальной оси  $N$ , а по данным шестого или седьмого датчика – отклонен влево. Это объясняется тем, что продольные волокна образца удлиняются, а поперечные волокна укорачиваются. Поэтому продольные деформации будут положительными, а поперечные – отрицательными.

По характеру графиков, которые имеют вид близкий к прямым, можно сделать вывод о том, что закон Гука выполняется. Незначительные отклонения опытных точек объясняются погрешностью измерительного прибора.

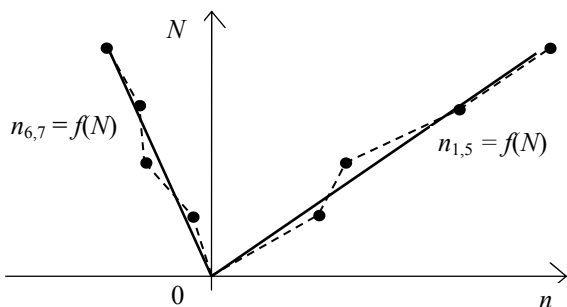


Рис. 14. Графики зависимости отсчетов по прибору от значения растягивающей силы

**Эюра продольных деформаций.** По результатам, полученным для первых пяти датчиков, можно построить эюру смещения точек поперечного сечения образца. В точках, где наклеены первые пять датчиков, следует отложить соответствующие значения средних приращений показаний прибора  $\Delta n_{mi}$ . Затем соединить полученные точки прямыми отрезками. В результате получим ломаную линию, которая изображает эюру продольных деформаций по ширине поперечного сечения образца (рис. 15).

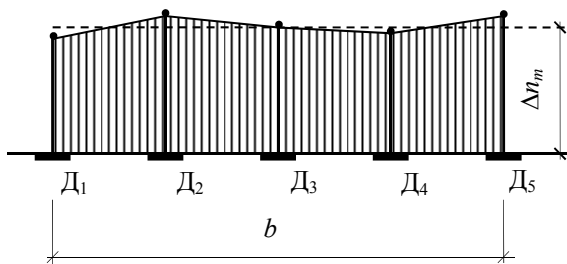


Рис. 15. Эюра продольных деформаций по ширине поперечного сечения

Затем следует вычислить среднеарифметическое значение средних приращений отсчетов по первым пяти датчикам:

$$\Delta n_m = \frac{\sum \Delta n_{mi}}{5}, \quad \Delta n'_m = \frac{\sum \Delta n'_{mi}}{5}. \quad (32)$$

После этого отложить полученную величину на графике от линии построения и провести штриховую линию. Полученная линия изображает усредненную эпюру смещений точек поперечного сечения. Сравнивая усредненную эпюру смещений и ломаную, полученную по значениям в опытных точках, можно сделать вывод, что гипотеза плоских сечений (гипотеза Бернулли) действительно подтверждается. Отклонение опытных точек от усредненной эпюры смещений объясняется неоднородностью материала, погрешностью измерений прибора и неабсолютной центровкой образца в захватах прессы.

### Результаты испытания и оформление отчета

По полученным результатам испытания необходимо определить модуль упругости и коэффициент Пуассона материала. Расчет выполнить в следующем порядке:

1. Вычислить максимальное напряжение в образце и сравнить его с пределом пропорциональности:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} \leq \sigma_{pr}. \quad (33)$$

2. Определить среднее приращение напряжения на ступени нагружения:

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta N_m}{A_0} = \frac{\Delta N_m}{hb}. \quad (34)$$

3. Определить относительную продольную деформацию, используя среднеарифметические значения средних приращений показаний прибора по первым пяти датчикам:

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{2\Delta n_m \alpha}{K}. \quad (35)$$

4. Определить относительную поперечную деформацию, используя арифметические значения средних приращений показаний прибора по шестому и по седьмому датчикам:

$$\Delta\varepsilon'_m = \frac{2\Delta n'_m \alpha}{K}. \quad (36)$$

5. По полученным значениям относительной продольной и относительной поперечной деформаций определить коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона):

$$\nu = \left| \frac{\Delta \varepsilon'_m}{\Delta \varepsilon_m} \right|. \quad (37)$$

6. Используя закона Гука  $\sigma = E\varepsilon$ , определить модуль упругости (модуль Юнга) испытываемого материала:

$$E = \frac{\Delta \sigma_m}{\Delta \varepsilon_m}. \quad (38)$$

7. Анализируя эпюру продольных деформаций по ширине сечения, сделать заключение о форме поперечного сечения после деформации образца и о справедливости гипотезы плоских сечений (гипотезы Бернулли).

8. Сравнить полученные при испытании значения модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  со значениями, приведенными в справочниках, и сделать вывод.

9. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в приложении.

#### Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ВТОРОГО РОДА (МОДУЛЯ СДВИГА)

Физическая постоянная  $G$  называется модулем упругости второго рода (модулем сдвига) и является коэффициентом зависимости, выражающей закон Гука при сдвиге  $\tau = G\gamma$ . Модуль сдвига характеризует жесткость материала при упругой деформации сдвига. Модуль сдвига  $G$  в отличие от модуля продольной упругости  $E$  и коэффициента поперечной деформации  $\nu$  является производной величиной и может быть найден как опытным способом, так и тео-

ретическим. Для изотропных материалов существует зависимость между этими величинами:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (39)$$

Определить значение модуля  $G$  непосредственно из опыта на сдвиг (срез) не представляется возможным. Это связано с тем, что обеспечить деформацию чистого сдвига в опыте, т. е. свободного от побочных деформаций технически трудно. Но, так как кручение стержня круглого поперечного сечения можно представить как чистый сдвиг материала за счет взаимного поворота поперечных сечений, то опытное определение модуля  $G$  удобнее производить при кручении стержня сплошного круглого, а лучше кольцевого сечения (образца в виде тонкостенной трубки).

Испытаниями установлено, что для материалов, деформирующихся по закону Гука при растяжении или сжатии, закон Гука справедлив и при деформациях сдвига, а значит и кручении. Закон Гука при кручении выражается зависимостью:

$$\Delta\varphi = \frac{T \cdot l}{G \cdot I_p}, \quad (40)$$

где  $T$  – крутящий момент на участке стержня;

$l$  – длина участка стержня;

$G$  – модуль сдвига;

$I_p$  – полярный момент инерции поперечного сечения;

$\Delta\varphi$  – абсолютная угловая деформация.

### Цель испытания

Определить опытным путем значение модуля сдвига для образца из стали, а также подтвердить закон Гука при кручении (сдвиге) и теоретическую зависимость между тремя упругими постоянными материала ( $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ ).

## Исходные данные

**Требования к испытанию.** Опытный образец следует нагружать крутящим моментом степенями. При этом нагрузка должна быть статической без толчков и вибрации. Максимальная нагрузка на образец не должна вызвать в нем напряжений, превышающих предел пропорциональности.

**Испытательная установка.** Для проведения опыта использована настольная установка (рис. 16). Нагружение опытного образца выполняется с помощью гири, перемещающейся по размеченному стальному стержню (рычагу). Максимальный создаваемый крутящий момент не должен превышать 20 Нм.

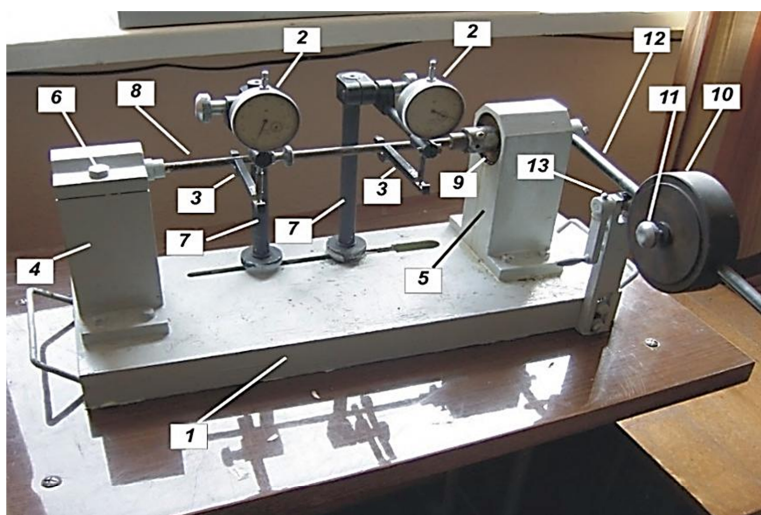


Рис. 16. Настольная установка для определения модуля сдвига:

- 1 – станина; 2 – механические тензометры (индикаторы часового типа);
- 3 – трубины; 4, 5 – опоры; 6 – зажимкой винт; 7 – штативы; 8 – образец (стальной стержень круглого сечения); 9 – подшипник; 10 – гиря; 11 – стопорный винт; 12 – рычаг (стальной стержень с разметкой); 13 – опора с кривошипом

Все детали установки закреплены к станине 1. В качестве образца использован стальной стержень круглого поперечного сечения 8, диаметром  $d$ . Стержень одним концом закреплен на опоре 4 с помощью зажимного винта 6 и пропущен через подшипник 9 на дру-



гой опоре 5. К правому концу стержня прикреплен стальной стержень 12 с насаженной на нем гирей 10 весом  $Q$ , положение которой может меняться. Положение гири фиксируется с помощью стопорного винта 11. На стальном стержне 12 нанесена разметка, выражающая момент, создаваемой гирей 10.

В монтажной щели установлены два штатива 7, которые удерживают два механических тензометра 2. С помощью трубочин 3 к образцу прикреплены стержни длиной  $L$ , расстояние между которыми является базой измерения и равно  $l$ . Измерительные стержни механических тензометров упираются на концы стержней 3. При нагружении образца крутящим моментом его сечения будут поворачиваться. Непосредственно измерить угол поворота с необходимой точностью не представляется возможным. Поэтому при помощи стрелочных индикаторов 2 измеряются линейные перемещения фиксированных точек трубочин 3, отстоящих на расстоянии  $L$  от оси стержня. Так как углы поворота сечений малы, то их определить можно по приближенной формуле.

### ***Измерительные приборы и инструменты.***

Для измерения геометрических размеров опытного образца используется штангенциркуль с ценой деления 0,05 или 0,1 мм. Для измерения линейных перемещений в опыте используются стрелочные индикаторы с ценой деления  $\alpha = 0,01$  мм.

## **Порядок проведения испытания и обработка результатов**

### ***Порядок проведения испытания:***

1. Ознакомиться с основными узлами и принципом работы испытательной установки.
2. Ослабить стопорный винт 11 и установить гирю 10 в положение, соответствующее делению с минимальным отсчетом на стержне 12.
3. Зажать стопорный винт 11.
4. Освободить стержень 12, повернув ручку кривошипа 13.
5. Поворотом шкал приборов 2 установить нулевые отсчеты.
6. Записать нулевые значения в таблицу.

7. Снять нагрузку с образца, вернув ручку кривошипа  $13$  в первоначальное положение.

8. Ослабить стопорный винт  $11$  и переместить гирю  $10$  в положение, соответствующее следующему делению на стержне  $12$ .

9. Зажать стопорный винт  $11$ .

10. Освободить стержень  $12$ , повернув ручку кривошипа  $13$ .

11. Снять отсчеты со шкал приборов  $2$  и записать их значения в журнал.

12. Повторять указанные действия до тех пор, пока положение гири будет соответствовать делению на стержне с максимальным отсчетом.

**Заполнение таблицы результатов испытания.** В таблицу заносить значения нагрузок (крутящих моментов)  $T$  и показания приборов  $n$  для каждой ступени нагружения. Далее следует определить приращения нагрузки  $\Delta T$  и показаний приборов  $\Delta n$  на каждой ступени нагружения. Для этого из последующего отсчета вычесть предыдущий отсчет и записать результат в позицию, расположенную между строками соответствующих нагрузок. Затем вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки и показаний приборов, которые записываются в нижней позиции каждого столбца таблицы.

**Построение графиков деформации.** Для подтверждения закона Гука при кручении (сдвиге) следует построить графики зависимостей углов поворота расчетных сечений от нагрузки (крутящего момента) (рис. 17). Так как отсчеты по приборам  $n$  пропорциональны углам поворота, поэтому график деформаций можно построить, используя значения отсчетов  $n$  и значения нагрузки  $T$ . Поместить первую точку графика в начале системы координатных осей  $n$  и  $T$ . Отложить от нуля на горизонтальной оси приращение  $\Delta n$ , соответствующее первой ступени нагружения, а на вертикальной оси  $\Delta T$ , соответствующее приращению нагрузки, и отметить точку с полученными координатами. Затем от полученных координат второй точки отложить  $\Delta n$ , соответствующее второй ступени нагружения, и  $\Delta T$ , соответствующее приращению нагрузки. В результате можно получить координаты третьей точки и так далее. Соединяя полученные точки штриховыми прямыми, построить ломаную линию. Далее следует провести прямую через полученные точки так, чтобы отклонение этих точек от проведенной прямой было бы минимальным.

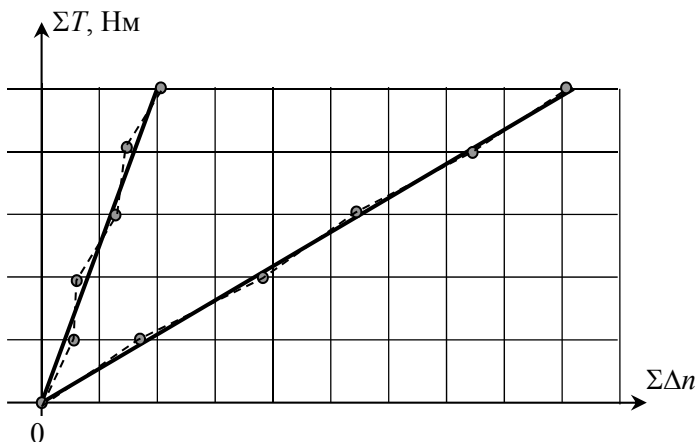


Рис. 17. Графики зависимости углов закручивания расчетных сечений стержня и крутящего момента

По характеру графиков, которые имеют вид, близкий к прямым, можно сделать вывод о том, что закон Гука выполняется. Незначительные отклонения опытных точек объясняется погрешностью измерительных приборов.

### Результаты испытания и оформление отчета

1. Используя стальную линейку, измерить расстояние между струбцинами (база измерений)  $l$  и с помощью штангенциркуля измерить диаметр образца  $d$ .

2. Вычислить геометрические характеристики поперечного сечения образца:

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}; \quad W_p = \frac{\pi d^3}{16}. \quad (41)$$

3. Вычислить максимальное касательное напряжение в образце, разделив максимальный крутящий момент на полярный момент сопротивления:

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_p}. \quad (42)$$

4. Сравнить полученное напряжение с пределом пропорциональности  $\sigma_{pr}$ . При этом следует учесть, что при кручении, материал испытывает чистый сдвиг. Поэтому максимальное нормальное напряжение, появляющееся при кручении, равно максимальному касательному напряжению. Убедиться, что предел пропорциональности не превышен и материал в опыте деформируется по закону Гука:

$$\tau_{\max} \leq 0,55 \cdot \sigma_{pr}. \quad (43)$$

5. Определить среднее приращение углов поворота расчетных сечений образца:

$$\Delta\theta_{1m} = \frac{\Delta V_{1m}}{L} = \frac{\Delta n_{1m} \alpha}{L}; \quad \Delta\theta_{2m} = \frac{\Delta V_{2m}}{L} = \frac{\Delta n_{2m} \alpha}{L}, \quad (44)$$

где  $\Delta V_{1m}$ ,  $\Delta V_{2m}$  – среднее приращение смещений точек опирания на струбцины измерительных стержней стрелочных тензометров;

$\Delta n_{1m}$ ,  $\Delta n_{2m}$  – среднее приращение показаний стрелочных индикаторов;

$\alpha$  – цена деления стрелочного индикатора.

6. Вычислить средний угол закручивания участка образца  $l$ , расположенного между струбцинами:

$$\Delta\theta_{12m} = \Delta\theta_{2m} - \Delta\theta_{1m}. \quad (45)$$

7. Используя закон Гука при кручении:

$$\Delta\theta_{12m} = \frac{\Delta T_m \cdot l}{G \cdot I_p}, \quad (46)$$

определить модуль сдвига по результатам опыта:

$$G^{\text{оп}} = \frac{\Delta T_m \cdot l}{\Delta\theta_{12m} \cdot I_p}. \quad (47)$$

8. Вычислить модуль сдвига по теоретической зависимости, приняв значения модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации для стали по справочнику:

$$G^{\text{теор}} = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (48)$$

9. Сравнить полученные результаты и сделать выводы:

$$\frac{G^{\text{теор}} - G^{\text{оп}}}{G^{\text{теор}}} \cdot 100, \%. \quad (49)$$

10. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в приложении.

### **Лабораторная работа № 5**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ**

Многие элементы конструкций испытывают плоский поперечный изгиб. При плоском поперечном изгибе в сечениях балки возникают нормальные  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения. Этот вид сопротивления более сложен, чем центральное растяжение (сжатие). Поэтому для упрощения расчетов в теории плоского изгиба используются некоторые гипотезы и допущения – гипотеза плоских сечений (гипотеза Бернулли), предположение о том, что продольные волокна испытывают только линейные деформации и гипотеза об отсутствии давления продольных волокон друг на друга, предположение о том, что зависимость между деформациями и напряжениями линейная (закон Гука).

Теоретические исследования, учитывающие принятые гипотезы и допущения, показывают, что при плоском изгибе нормальные напряжения распределяются по высоте сечения балки по линейному закону и достигают наибольших значений в крайних волокнах. Нейтральный слой для прямых стержней, где нормальные напряжения равны нулю, проходит на уровне центра тяжести сечения балки.

Полученные формулы для плоского изгиба просты и удобны для расчета, но являются приближенными. Степень достоверности их может быть оценена результатами испытания балок.

### Цель испытания

Цель лабораторной работы – установить закон распределения нормальных напряжений по высоте заданного сечения балки, определить значения этих напряжений и сравнить их с теоретическими. На основании данных, полученных в результате испытания балки, требуется подтвердить справедливость закона Гука при плоском изгибе, а также гипотезу плоских сечений.

### Исходные данные

**Требования к испытанию.** При выполнении работы требуется, чтобы нагружение опытной балки осуществлялось статической нагрузкой ступенями, желательно равными, а также, чтобы максимальная нагрузка на балку не вызывала напряжений, превышающих предела пропорциональности, т. е.  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$ .

**Испытательная установка.** Для проведения опыта используется специально изготовленный балочный испытатель (рис. 18). Объектом исследования является однопролетная стальная прокатная двутавровая балка 1, опирающаяся на шарнирно-неподвижную опору (слева) и на шарнирно-подвижную опору (справа) 2. Нагружение балки выполняется с помощью гидравлического домкрата 5 с максимальным усилием 100 кН, установленного на нижнюю траверсу 6 и упирающегося в опорную составленную из двух швеллеров балку 3.

Усилие на нижнюю траверсу 6 от гидравлического домкрата 5 через тяжи 8 передается на верхнюю траверсу 7 и прикладывается к балке 1. Величина усилия контролируется манометром домкрата 5.

В расчетном сечении наклеены пять датчиков. Один датчик расположен на уровне центра тяжести сечения балки, два – на расстоянии от центра тяжести, равном одной четверти высоты сечения балки. По одному датчику наклеено на верхней и на нижней полках балки. Датчики предназначены для измерения деформаций продольных волокон балки. Поэтому их рабочее направление совпадает

с направлением оси балки. Для компенсации влияния температуры установлен компенсирующий датчик 10, расположенный на конце консольной части балки.

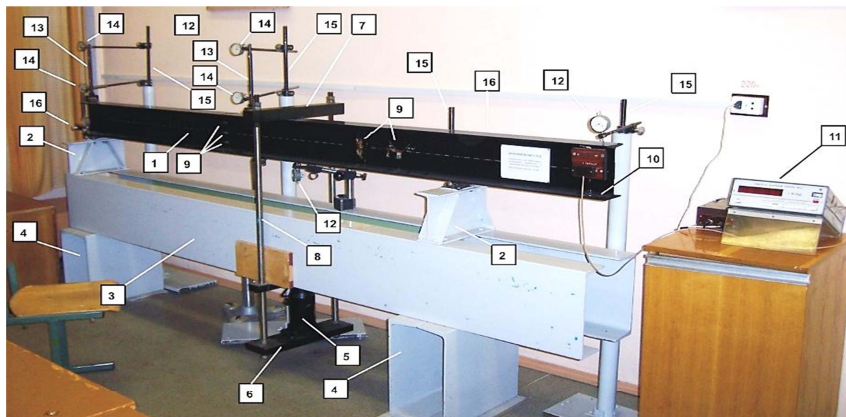


Рис. 18. Балочный испытатель:

1 – прокатный двутавр; 2 – опоры балки; 3 – опорная балка, составленная из двух швеллеров; 4 – опоры опытной установки; 5 – гидравлический домкрат; 6 – нижняя траверса; 7 – верхняя траверса; 8 – стальные тяжи; 9 – датчики сопротивления в расчетных сечениях; 10 – компенсирующий датчик; 11 – измеритель деформации цифровой; 12 – стрелочные тензомеры для измерения прогибов балки; 13 – стержни, прикрепленные к балке; 14 – стрелочные тензомеры, предназначенные для измерения углов поворота расчетных сечений; 15 – штативы, удерживающие стрелочные тензомеры; 16 – стрелочные тензомеры, предназначенные для измерения деформаций опор балки

**Измерительные приборы и инструменты.** В лабораторной работе для измерения пролета и консоли балки, расстояния от левой опоры до расчетного сечения использовалась стальная лента, для измерения высоты сечения и средней толщины его полки использован штангенциркуль, а для измерения деформаций продольных волокон балки использовались проволочные датчики сопротивления и измеритель деформации ИДЦ с ценой деления  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ . Отметим, что измеритель деформаций ИДЦ предназначен для измерения относительных линейных деформаций. Поэтому его цена деления  $\alpha$  – безразмерная величина.

## Порядок проведения испытания и обработка результатов

### *Порядок проведения испытания:*

1. Включить питание измерителя деформации ИДЦ.
2. С помощью стальной измерительной ленты определить расстояние между опорами балки и длину ее консоли.
3. Измерить расстояние между левой опорой балки и расчетным сечением.
4. Измерить расстояние от левой опоры балки до середины верхней траверсы загрузочного узла.
5. С помощью штангенциркуля измерить высоту сечения двутавра и среднюю толщину его полки.
6. Используя таблицы прокатных профилей установить номер двутавра и его геометрические характеристики.
7. Повернуть рычаг домкрата по ходу часовой стрелки и закрыть выпускной клапан гидравлического домкрата.
8. Совершая колебательные движения рычагом, закачивать масло в цилиндр гидравлического домкрата до тех пор, пока нагрузка на балке не достигнет величины равной первой ступени нагружения.
9. С помощью кнопок на панели измерителя деформации последовательно подключать датчики к прибору, нажимать кнопку прибора «Пуск» и записывать отсчеты в таблицу.
10. Повторить действия при второй, третьей и других ступенях нагружения.
11. После завершения испытания снять нагрузку на балку, повернув рычаг гидравлического домкрата против хода часовой стрелки и выпустить масло из цилиндра.

**Заполнение таблицы результатов испытания.** Записать в колонки  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_5$  таблицы результатов испытания значения нагрузок и отсчеты по измерителю деформаций ИДЦ (стр. 95).

### Результаты испытания

1. Вычитая из последующего значения предыдущее в колонках  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_5$  таблицы опытных данных, вычислить приращение нагрузки  $\Delta F$  и приращения показаний ИДЦ  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta n_3$ ,  $\Delta n_4$ ,  $\Delta n_5$  и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных (стр. 95).



2. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки  $\Delta F_m$  и средние значения приращений показаний прибора ИДЦ для каждого датчика  $\Delta n_{1m}, \Delta n_{2m}, \Delta n_{3m}, \Delta n_{4m}, \Delta n_{5m}$  и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных (стр. 95).

3. Построить график зависимости деформации продольного волокна от нагрузки. Так как деформация продольного волокна прямо пропорциональна разности показаний ИДЦ на ступени нагружения, на вертикальной оси откладывать вместо деформации сумму приращений  $\Sigma \Delta n_i$  показаний прибора. На горизонтальной оси откладывать сумму приращений нагрузки  $\Sigma \Delta F_i$ . Полученные точки соединить прямыми штриховыми отрезками, а затем через каждую группу точек провести сплошные прямые так, чтобы сумма отклонений была минимальной. Из графиков (рис. 19) очевидно, что относительные линейные деформации продольных волокон действительно близки к прямолинейным зависимостям. Поэтому закон Гука выполняется. В местах установки датчиков  $D_1$  и  $D_2$  продольные волокна укорачиваются, а в местах установки датчиков  $D_4$  и  $D_5$  продольные волокна удлиняются. На уровне центра тяжести сечения (датчик  $D_3$ ) деформация продольного волокна близка к нулю. Это подтверждает, что слой нейтральных волокон расположен на уровне центра тяжести сечения.

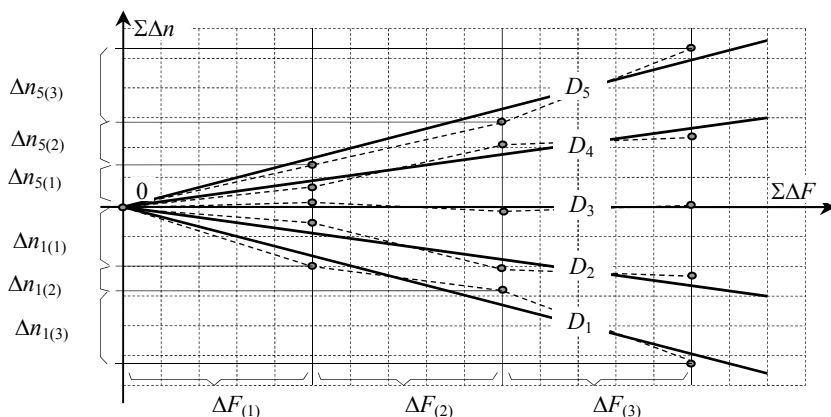


Рис. 19. Графики зависимости относительной линейной деформаций от нагрузки (в скобках указан номер ступени нагружения, за скобками – номер датчика)

4. Вычислить средние относительные линейные деформации продольных волокон балки в местах установки датчиков:

$$\varepsilon_{i,m} = \frac{2\Delta n_{i,m} \cdot \alpha}{K}. \quad (50)$$

5. Построить эпюру средних относительных линейных деформаций по высоте сечения балки (рис. 20). Для этого в масштабе отложить полученные значения  $\varepsilon_{i,m}$  и соединить полученные точки прямыми отрезками. Затем провести прямую линию так, чтобы сумма отклонений была минимальной. Убедиться, что полученная эпюра относительных линейных деформаций (рис. 20) незначительно отклоняется от прямой. Это подтверждает гипотезу плоских сечений.

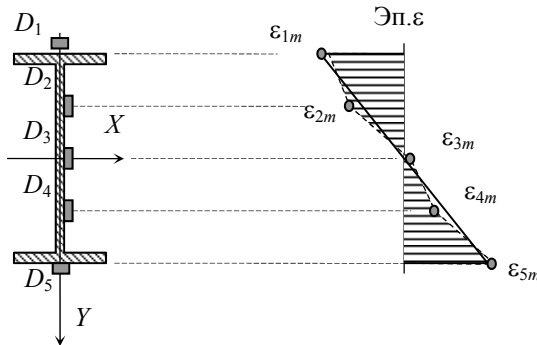


Рис. 20. Эпюра относительных линейных деформаций

6. По результатам опыта, используя закон Гука, в местах установки датчиков вычислить средние нормальные напряжения:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i. \quad (51)$$

Значение модуля упругости взять из справочника.

### Результаты теоретического расчета

1. Построить расчетную схему балки с указанием места приложения нагрузки (рис. 21).

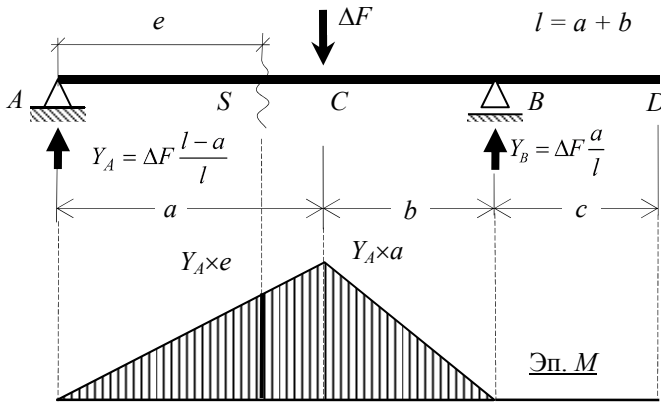


Рис. 21. Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов

2. Из уравнений равновесия вычислить реакции опор балки:

$$\sum M_A = \Delta F \cdot a - Y_B \cdot l = 0; \quad \sum M_B = Y_A \cdot l - \Delta F \cdot (l - a) = 0; \quad (52)$$

$$Y_B = \Delta F \frac{a}{l}; \quad Y_A = \Delta F \frac{l - a}{l}. \quad (53)$$

3. Определить максимальный изгибающий момент (момент в сечении C) и момент в расчетном сечении S:

$$M_C = Y_A \cdot a; \quad M_S = Y_A \cdot e. \quad (54)$$

4. Вычислить нормальные напряжения в точках сечения S:

$$\sigma_i = \frac{M_S}{I_X} \cdot y_i, \quad (55)$$

где  $y_i$  – координата точки сечения, в которой установлен датчик  $D_i$ .

Построить в расчетном сечении эпюры нормальных напряжений, полученные в опыте и теоретически (рис. 22).

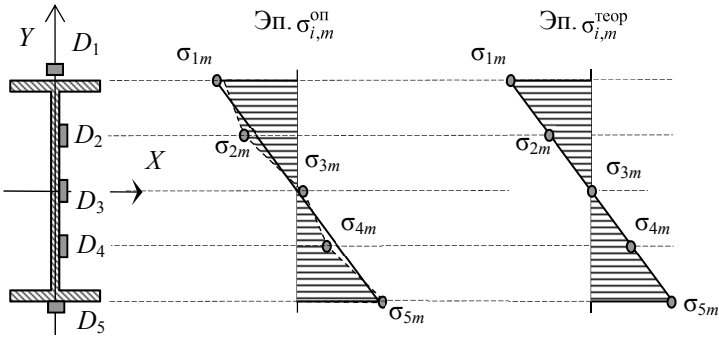


Рис. 22. Эпюры нормальных напряжений, полученных в опыте и теоретическим расчетом

5. Сравнить результаты опыта и теоретического расчета. Отличие напряжений оценить в процентах:

$$D_i \% = \left| \frac{\sigma_i^{\text{оп}} - \sigma_i^{\text{теор}}}{\sigma_i^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% \quad (56)$$

Если в знаменателе приведенной формулы для  $D_i\%$  содержится ноль, значение  $D_i\%$  не вычисляется, а в таблице ставится прочерк.

Таблица 3

Сравнение опытных и теоретических результатов

Напряжения	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$
Опытные, МПа	$\sigma_1^{\text{оп}}$	$\sigma_2^{\text{оп}}$	$\sigma_3^{\text{оп}}$	$\sigma_4^{\text{оп}}$	$\sigma_5^{\text{оп}}$
Теоретические, МПа	$\sigma_1^{\text{теор}}$	$\sigma_2^{\text{теор}}$	$\sigma_3^{\text{теор}}$	$\sigma_4^{\text{теор}}$	$\sigma_5^{\text{теор}}$
Отличие, %	$D_1, \%$	$D_2, \%$	$D_3, \%$	$D_4, \%$	$D_5, \%$

6. По полученным результатам сделать вывод.

7. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в приложении.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

При плоском поперечном изгибе в сечениях балки появляются два вида внутренних сил – поперечные силы и изгибающие моменты. В расчетном сечении поперечная сила вызывает касательные напряжения, а изгибающий момент – нормальные напряжения. Оба напряжения лежат в одной плоскости, поэтому материал балки испытывает плоское напряженное состояние. Однако в различных местах балки имеют место разные напряженные состояния. Так, в ее крайних волокнах присутствуют только нормальные напряжения, а касательные равны нулю. Поэтому материал испытывает линейное напряженное состояние. В нейтральных волокнах, напротив, нормальные напряжения равны нулю, а касательные напряжения максимальные. Поэтому материал вблизи нейтрального слоя испытывает чистый сдвиг. Общий вид плоского напряженного состояния испытывает материал, расположенный между крайними и нейтральными волокнами, так как там присутствуют как нормальные, так и касательные напряжения.

#### Цель испытания

Цель работы – установить вид напряженного состояния в точках, расположенных по краям сечения, на уровне нейтрального слоя и на одной четверти высоты балки. Сравнить результаты, полученные испытанием балки и теоретическим расчетом.

#### Исходные данные

**Требования к испытанию.** При выполнении испытания требуется, чтобы нагружение опытной балки осуществлялось статической нагрузкой (без толчков и вибрации) и чтобы максимальное ее значение не вызывало напряжений, превышающих предел пропорциональности для материала балки.

**Испытательная установка.** Для проведения опыта используется специальный балочный испытатель. Вид и описание деталей установки приведен на рис. 18. Опыт проводится на стальной прокатной балке двутаврового профиля. Для выполнения расчетов принять  $E = 206 \text{ МПа}$ ,  $\nu = 0,3$ .

**Измерительные приборы и инструменты.** В лабораторной работе для измерения деформаций используются датчики сопротивления (тензорезисторы) с базой измерения 20 мм, измеритель деформаций цифровой (ИДЦ) с ценой деления  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$  и измерительная стальная линейка (лента). Схема установки с расположением датчиков приведена на рис. 23.

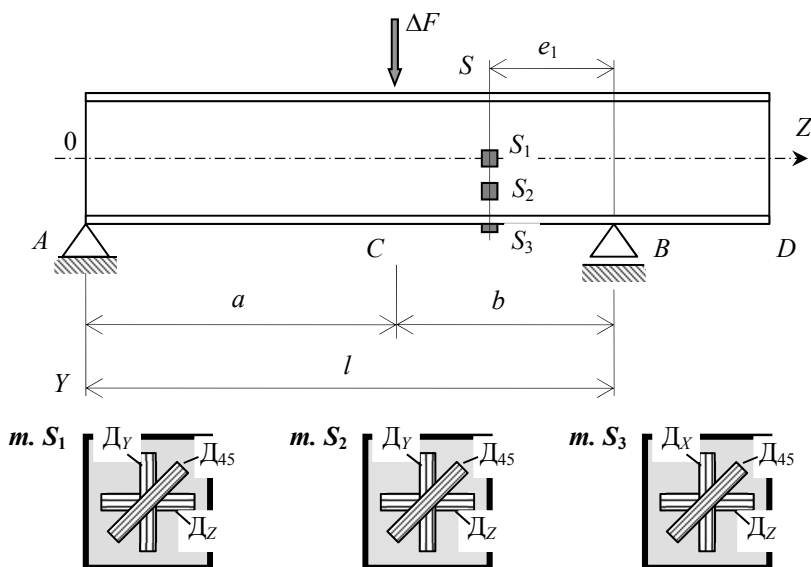


Рис. 23. Схема балки с указанием положения датчиков

**Схема установки с указанием расположения датчиков и приборов.** Исследуемая балка является шарнирно-опертой и загружена сосредоточенной силой. Увеличение нагрузки производится равными по величине ступенями. Исследование напряженного состояния производится в трех точках указанного сечения  $S$  балки: на уровне нейтрального слоя (точка  $S_1$ ), на четверти высоты от этого слоя (точка  $S_2$ ) и в крайних нижних волокнах (точка  $S_3$ ). В названных точках установлены тензометрические розетки. Каждая розетка состоит из трех датчиков, два из которых взаимно перпендикулярны, а третий под углом  $45^\circ$  к оси балки.

Отметим, что взаимно перпендикулярная пара датчиков может располагаться произвольно по отношению к оси балки, так как

здесь важна их взаимная перпендикулярность, а не положение каждого из них. На опытной установке рабочее направление одного из датчиков вертикально, а другого – горизонтально.

При помощи датчиков и прибора ИДЦ измеряются относительные продольные деформации волокон в рабочем направлении этих датчиков, которые затем используются для определения главных напряжений в опытных точках.

### **Порядок проведения испытания и обработка результатов**

#### ***Порядок проведения испытания:***

1. Включить питание измерителя деформации ИДЦ.
2. С помощью стальной измерительной ленты измерить расстояние между опорами балки и длину ее консоли.
3. Измерить расстояние между правой опорой балки и расчетным сечением.
4. Измерить расстояние от левой опоры балки до середины верхней траверсы загрузочного узла.
5. С помощью стальной ленты и штангенциркуля измерить высоту сечения двутавра и среднюю толщину его полки.
6. Используя таблицы прокатных профилей установить номер двутавра и геометрические характеристики его сечения.
7. Повернув рычаг домкрата по ходу часовой стрелки, закрыть выпускной клапан гидравлического домкрата.
8. Совершая колебательные движения рычагом, закачивать масло в цилиндр гидравлического домкрата до тех пор, пока нагрузка на балке не достигнет величины, равной первой ступени нагружения.
9. С помощью кнопок на панели измерителя деформации последовательно подключать датчики, нажимать кнопку прибора «Пуск», фиксировать отсчеты по прибору и заносить их значения в журнал испытания.
10. Повторить действия при нагружении балки второй, третьей и т. д. ступенями нагружения.
11. После завершения испытания снять нагрузку с балки: открыть клапан и выпустить масло из цилиндра, повернув рычаг гидравлического домкрата против хода часовой стрелки.

**Заполнение таблицы результатов испытания.** Для исследования выбрать точку  $S_3$  и любую из точек  $S_1$  или  $S_2$ . Записать в колонки  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , ( $n_4$ ,  $n_5$ ,  $n_6$  или  $n_7$ ,  $n_8$ ,  $n_9$ ) таблицы результатов испытания значения нагрузок и отсчеты по измерителю деформаций ИДЦ-1 (табл. 4).

### Результаты испытания

1. Вычитая из последующего значения предыдущее в колонках  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , ( $n_4$ ,  $n_5$ ,  $n_6$ , или  $n_7$ ,  $n_8$ ,  $n_9$ ) таблицы опытных данных, найти приращения нагрузки  $\Delta F$  и приращения показания ИДЦ-1  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta n_3$ , ( $\Delta n_4$ ,  $\Delta n_5$ ,  $\Delta n_6$  или  $\Delta n_7$ ,  $\Delta n_8$ ,  $\Delta n_9$ ) для каждой ступени нагружения.

2. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки  $\Delta F_m$  и средние значения приращений показаний прибора ИДЦ для каждого датчика  $\Delta n_{1m}$ ,  $\Delta n_{2m}$ ,  $\Delta n_{3m}$ , ( $\Delta n_{4m}$ ,  $\Delta n_{5m}$ ,  $\Delta n_{6m}$ , или  $\Delta n_{7m}$ ,  $\Delta n_{8m}$ ,  $\Delta n_{9m}$ ) и записать их в соответствующие позиции табл. 4 опытных данных.

Таблица 4

Результаты испытания в случае исследования в точках  $S_1$  и  $S_3$

Точки		$S_1$						$S_3$					
Датчики		$D_1$		$D_2$		$D_3$		$D_7$		$D_8$		$D_9$	
Показания		$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$	$n_7$	$\Delta n_7$	$n_8$	$\Delta n_8$	$n_9$	$\Delta n_9$
$F$	$\Delta F$												
$F_1$		$n_{1(1)}$		$n_{2(1)}$	$\Delta n_2^{(21)}$	$n_{3(1)}$		$n_{7(1)}$		$n_{8(1)}$		$n_{9(1)}$	
	$\Delta F_{12}$		$\Delta n_1^{(21)}$				$\Delta n_3^{(21)}$		$\Delta n_7^{(21)}$		$\Delta n_8^{(21)}$		$\Delta n_9^{(21)}$
$F_2$		$n_{1(2)}$		$n_{2(2)}$		$n_{3(2)}$		$n_{7(2)}$		$n_{8(2)}$		$n_{9(2)}$	
	$\Delta F_{23}$		$\Delta n_1^{(32)}$		$\Delta n_2^{(32)}$		$\Delta n_3^{(32)}$		$\Delta n_7^{(32)}$		$\Delta n_8^{(32)}$		$\Delta n_9^{(32)}$
$F_3$		$n_{1(3)}$		$n_{2(3)}$		$n_{3(3)}$		$n_{7(3)}$		$n_{8(3)}$		$n_{9(3)}$	
	$\Delta F_{34}$		$\Delta n_1^{(43)}$		$\Delta n_2^{(43)}$		$\Delta n_3^{(43)}$		$\Delta n_7^{(43)}$		$\Delta n_8^{(43)}$		$\Delta n_9^{(43)}$
$F_4$		$n_{1(4)}$		$n_{2(4)}$		$n_{3(4)}$		$n_{7(4)}$		$n_{8(4)}$		$n_{9(4)}$	
	$\Delta F_{45}$		$\Delta n_1^{(54)}$		$\Delta n_2^{(54)}$		$\Delta n_3^{(54)}$		$\Delta n_7^{(54)}$		$\Delta n_8^{(54)}$		$\Delta n_9^{(54)}$
$F_5$		$n_{1(5)}$		$n_{2(5)}$		$n_{3(5)}$		$n_{7(5)}$		$n_{8(5)}$		$n_{9(5)}$	
	$\Delta F_{56}$		$\Delta n_1^{(65)}$		$\Delta n_2^{(65)}$		$\Delta n_3^{(65)}$		$\Delta n_7^{(65)}$		$\Delta n_8^{(65)}$		$\Delta n_9^{(65)}$
$F_6$		$n_{1(6)}$		$n_{2(6)}$		$n_{3(6)}$		$n_{7(6)}$		$n_{8(6)}$		$n_{9(6)}$	
	$\Delta F_m =$		$\Delta n_{1m} =$		$\Delta n_{2m} =$		$\Delta n_{3m} =$		$\Delta n_{7m} =$		$\Delta n_{8m} =$		$\Delta n_{9m} =$

*Примечание:* индекс в нижних скобках обозначает номер ступени нагружения, индекс без скобок – номер канала измерения.



3. Построить график зависимости деформации продольного волокна от нагрузки (рис. 24). Для этого воспользоваться показаниями, полученными по датчику 9 или по датчику 6. Так как деформация продольного волокна прямо пропорциональна разности показаний ИДЦ-1 на ступени нагружения, на вертикальной оси откладывать вместо деформации сумму приращений  $\Sigma\Delta n_i$  показаний прибора.

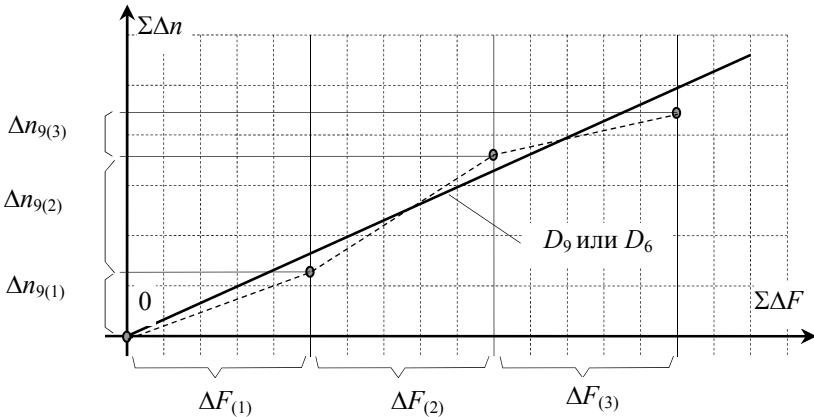


Рис. 24. График зависимости относительной линейной деформаций от нагрузки (в скобках указан номер ступени нагружения)

На горизонтальной оси откладывать сумму приращений нагрузки  $\Sigma\Delta F_i$ . Полученные точки соединить прямыми штриховыми отрезками, а затем провести сплошную прямую линию так, чтобы отклонение от нее отмеченных точек было минимально. Из графика (рис. 24) убедиться, что закон изменения относительной линейной деформации продольного волокна от нагрузки действительно близок к прямолинейному. Поэтому закон Гука выполняется.

4. Вычислить средние относительные линейные деформации в исследуемых точках, используя формулу:

$$\varepsilon_{i,m} = \frac{2\Delta n_{i,m} \cdot \alpha}{K}. \quad (57)$$

5. Определить угловую деформацию (угол сдвига) материала в исследуемых точках:

$$\gamma_{yz} = \varepsilon_y + \varepsilon_z - 2\varepsilon_{45}. \quad (58)$$

6. Найти экстремальные относительные деформации материала в исследуемых точках:

$$\varepsilon_{\max/\min} = \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_z}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_{45})^2}. \quad (59)$$

7. Определить экстремальные нормальные напряжения в исследуемых точках:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\max} + \nu\varepsilon_{\min}); \quad \sigma_{\min} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\min} + \nu\varepsilon_{\max}). \quad (60)$$

8. Вычислить наибольшие касательные напряжения:

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \gamma_{yz}^2}. \quad (61)$$

9. Определить направление главных осей деформации:

$$\alpha_0 = \arctg \left| \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_z - 2 \cdot \varepsilon_{45}}{\varepsilon_y - \varepsilon_z} \right|. \quad (62)$$

Так как материал двутавровой балки является изотропным, то направление осей главных деформаций и направления главных напряжений совпадают. Направление большего экстремального напряжения показать, откладывая угол  $\alpha_0$  от оси  $Z$ . Минимальное экстремальное нормальное напряжение будет направлено перпендикулярно направлению максимального экстремального напряжения.

10. Определить значения главных напряжений, присваивая первый индекс максимальному экстремальному нормальному напряжению, третий индекс – минимальному экстремальному напряжению и принять нулевое значение для главного напряжения с индексом два:

$$\sigma_1 = \sigma_{\max}; \quad \sigma_2 = 0; \quad \sigma_3 = \sigma_{\min}. \quad (63)$$

## Результаты теоретического расчета

1. Построить расчетную схему балки с указанием места приложения нагрузки и расположения расчетного сечения (рис. 25).

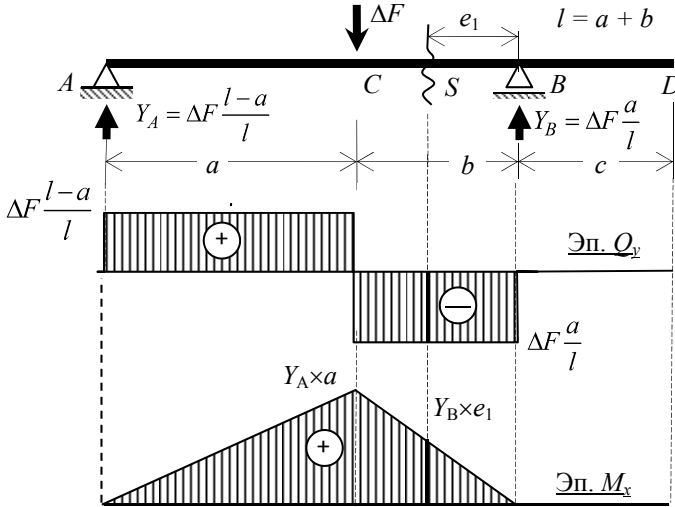


Рис. 25. Расчетная схема балки и эпюры  $M_x$  и  $Q_y$

2. Из уравнений равновесия:

$$\sum M_A = \Delta F \cdot a - Y_B \cdot l = 0; \quad \sum M_B = Y_A \cdot l - \Delta F \cdot (l - a) = 0 \quad (64)$$

вычислить реакции опор балки:

$$Y_B = \Delta F \frac{a}{l}; \quad Y_A = \Delta F \frac{l - a}{l}. \quad (65)$$

3. Определить максимальный изгибающий момент (момент в месте приложения нагрузки) и момент в расчетном сечении  $S$ :

$$M_C = Y_A \cdot a; \quad M_S = Y_B \cdot e_1. \quad (66)$$

4. Вычислить нормальные напряжения в точках расчетного сечения:

$$\sigma_i = \frac{M_S}{I_X} \cdot y_i, \quad (67)$$

где  $y_i$  – координата точек расчетного сечения, в которых установлены розетки датчиков ( $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ );

$i$  – номер расчетной точки.

5. Вычислить касательные напряжения в точках расчетного сечения по формуле Журавского:

$$\tau_i = \frac{Q_y \cdot S_{xi}^0}{I_x \cdot s}, \quad (68)$$

где  $Q_y$  – поперечная сила в расчетном сечении;

$I_x$  – момент инерции поперечного сечения двутавровой балки;

$s$  – толщина стенки двутавра;

$S_x^0$  – статический момент отсеченной части сечения балки.

Статический момент отсеченной части сечения вычислить для точки  $S_2$  по формуле:

$$S_{x2}^0 = S_x^0 - \frac{h}{4} \cdot s \cdot \frac{h}{8} = S_x^0 - \frac{h^2 \cdot s}{32}, \quad (69)$$

где  $h$  – высота сечения двутавра.

Для точки  $S_1$  статический момент равен  $S_x^0$ . Для точки  $S_3$  статический момент отсеченной части равен нулю. Величины  $I_x$ ,  $S_x^0$ ,  $s$ ,  $h$  взять из таблиц прокатных профилей.

6. Во всех расчетных точках определить максимальные касательные напряжения:

$$\tau_{i,\max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + 4 \cdot \tau_i^2}. \quad (70)$$

7. Определить экстремальные максимальные нормальные напряжения:

$$\sigma_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\sigma_i}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + 4 \cdot \tau_i^2}. \quad (71)$$

8. Определить положение главных площадок (направление главных напряжений):

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \cdot \tau_i}{\sigma_i} \right). \quad (72)$$

9. Показать элемент, построенный из главных площадок (рис. 26).

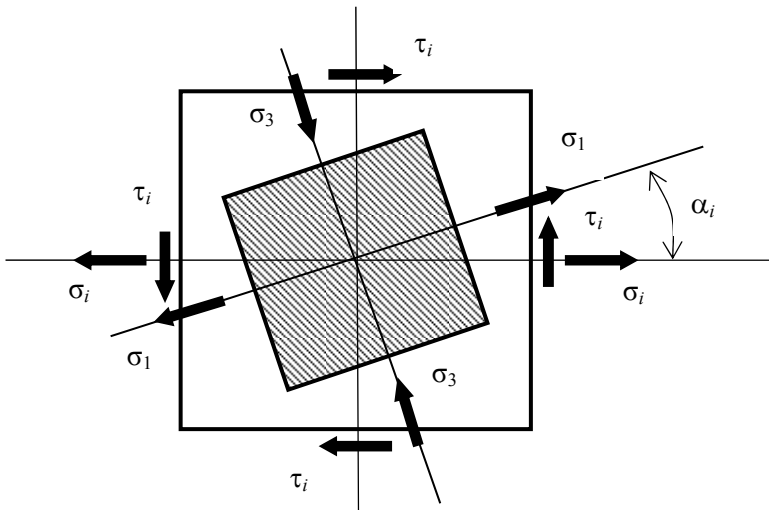


Рис. 26. Положение элемента с главными площадками и главными напряжениями

10. Сравнить результаты опыта и теоретического расчета в выбранных для исследования точках (табл. 5). Отличие максимальных нормальных и касательных напряжений, а также угла поворота главных площадок оценить в процентах:

$$D_i \% = \left| \frac{\sigma_{i,\max}^{\text{оп}} - \sigma_{i,\max}^{\text{теор}}}{\sigma_{i,\max}^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (73)$$

$$D_i \% = \left| \frac{\sigma_{i,\min}^{\text{оп}} - \sigma_{i,\min}^{\text{теор}}}{\sigma_{i,\min}^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (74)$$

$$D_i \% = \left| \frac{\tau_{i,\max}^{\text{оп}} - \tau_{i,\max}^{\text{теор}}}{\tau_{i,\max}^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (75)$$

$$D_i \% = \left| \frac{\alpha_i^{\text{оп}} - \alpha_i^{\text{теор}}}{\alpha_i^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% , \quad (76)$$

где  $i$  – номер точки ( $S_1, S_2, S_3$ ).

Таблица 5

Сравнение опытных и теоретических результатов

Точки	$S_1 (S_2)$				$S_2$			
	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\tau_{\max}$ , МПа	$\alpha_0$ , град	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\tau_{\max}$ , МПа	$\alpha_0$ , град
Опытная	$\sigma_{\max}^{\text{оп}}$	$\sigma_{\min}^{\text{оп}}$	$\tau_{\max}^{\text{оп}}$	$\alpha_0^{\text{оп}}$	$\sigma_{\max}^{\text{оп}}$	$\sigma_{\min}^{\text{оп}}$	$\tau_{\max}^{\text{оп}}$	$\alpha_0^{\text{оп}}$
Теорети- ческая	$\sigma_{\max}^{\text{теор}}$	$\sigma_{\min}^{\text{теор}}$	$\tau_{\max}^{\text{теор}}$	$\alpha_0^{\text{теор}}$	$\sigma_{\max}^{\text{теор}}$	$\sigma_{\min}^{\text{теор}}$	$\tau_{\max}^{\text{теор}}$	$\alpha_0^{\text{теор}}$
Отличие, %	$D_{\sigma \max}$	$D_{\sigma \min}$	$D_{\tau \max}$	$D_{\alpha}$	$D_{\sigma \max}$	$D_{\sigma \min}$	$D_{\tau \max}$	$D_{\alpha}$

11. По полученным результатам сделать вывод.

12. Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета по лабораторной работе приведен в приложении.

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

При расчете изгибаемых элементов зданий и строительных сооружений следует выполнять требования не только по прочности, но и по жесткости. Это значит, что прогибы балок лимитированы и не могут превышать нормативных величин. Необходимость выполнения условий по жесткости связана с технологическими требованиями – обеспечением нормальных условий эксплуатации технологического оборудования (станков, технологических линий, восприятие вибраций и динамики и пр.), а также эстетических требований в помещениях, где находятся люди (жилые помещения, производственные и административные здания).

Под действием внешних сил балка деформируется, в результате чего ее ось искривляется. Деформация изгиба балок характеризуется углами поворота поперечных сечений  $\theta$  и прогибом  $V$ . Эти параметры могут быть определены теоретически и по результатам опыта. Для расчета прогибов и углов поворота поперечных сечений балки в лабораторной работе следует использовать метод начальных параметров, суть которого состоит в решении приближенного дифференциального уравнения изгиба балки. Решение получается в виде степенного полинома с двумя неизвестными, которые называются начальными параметрами. Первый начальный параметр равен прогибу левого крайнего сечения балки, а второй – углу поворота этого же сечения.

Полученное дифференциальное уравнение и его решение не учитывают деформации балки, вызванные поперечными силами, и поэтому является приближенными. Для тонких балок с отношением ее длины к высоте поперечного сечения не менее десяти поперечные силы вызывают незначительные деформации. Поэтому ими можно пренебречь. Как раз такие балки чаще всего встречаются в строительных конструкциях. В связи с этим метод начальных параметров пригоден для расчета деформаций балок и балочных плит.

## Цель испытания

1. Проверить достоверность обобщенного уравнения оси изогнутой балки (метод начальных параметров) в связи с некоторыми допущениями в теории плоского изгиба.
2. Подтвердить пропорциональность зависимости прогибов от нагрузки (закон Гука).

## Исходные данные

**Требования к испытанию.** Нагружение балки выполнять статической нагрузкой (без толчков и вибрации) равными ступенями. Максимальный относительный прогиб балки не должен превышать  $1/400$  пролета.

**Испытательная установка.** Описание образца и нагружающего устройства приведено в подразделе «Испытательная установка» лабораторной работы № 6. Для измерения деформаций используются механические стрелочные тензометры с ценой деления  $\alpha = 0,01$  мм. Для определения прогибов в пролете балки (точка  $S$ ) и на ее консоли (точка  $D$ ) установлены стрелочные тензометры  $12$  (рис. 18). Определение углов поворота сечения на левой опоре (точка  $A$ ) и сечения в пролете (точка  $S$ ) выполняется с помощью механических тензометров  $14$ , которые непосредственно измеряют перемещения соответствующих точек стержней  $13$ , прикрепленных к балке. Для учета деформаций опор балки на них установлены стрелочные тензометры  $16$ . Все стрелочные тензометры удерживаются штативами, установленными на полу лаборатории.

**Измерительные приборы и инструменты.** В лабораторной работе для измерения пролета и консоли балки, расстояния от левой опоры до расчетного сечения использовалась стальная лента, для измерения высоты сечения и средней толщины полки двутавра использован штангенциркуль, а для измерения прогибов и углов поворота сечений балки использованы стрелочные механические тензометры с ценой деления  $\alpha = 0,01$  мм.



## Порядок проведения испытания и обработка результатов

### *Порядок проведения испытания:*

1. С помощью стальной измерительной ленты измерить расстояние между опорами балки и длину ее консоли.
2. Измерить расстояние между левой опорой балки и расчетным сечением.
3. Измерить расстояние от левой опоры балки до середины верхней траверсы загрузочного узла.
4. С помощью штангенциркуля измерить высоту сечения двутавра и среднюю толщину его полки.
5. Используя таблицы прокатных профилей, установить номер двутавра и геометрические характеристики его поперечного сечения.
6. Закрыть выпускной клапан гидравлического домкрата, повернув рычаг домкрата по ходу часовой стрелки.
7. Совершая колебательные движения рычагом, закачивать масло в цилиндр гидравлического домкрата до тех пор, пока нагрузка на балке не достигнет первой ступени.
8. Поворачивая шкалы стрелочных индикаторов, установить на всех тензометрах нулевой отсчет.
9. Снять отсчеты по всем восьми стрелочным тензометрам и записать их в таблицу.
10. Повторить действия при второй, третьей и т. д. ступенях нагружения.
11. После завершения испытания разгрузить балку. Для этого выпустить масло из цилиндра, повернув рычаг гидравлического домкрата против хода часовой стрелки.

**Заполнение таблицы результатов испытания.** Записать в колонки  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_5$ ,  $n_6$ ,  $n_7$ ,  $n_8$  таблицы результаты испытания: значения нагрузок и отсчеты по стрелочным тензометрам (стр. 104–105).

### Результаты испытания и оформление отчета

1. Вычитая из последующего значения предыдущее в колонках  $F$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_5$ ,  $n_6$ ,  $n_7$ ,  $n_8$  таблицы опытных данных, вычислить приращение нагрузки  $\Delta F$  и приращения показания стрелочных тензометров  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta n_3$ ,  $\Delta n_4$ ,  $\Delta n_5$ ,  $\Delta n_6$ ,  $\Delta n_7$ ,  $\Delta n_8$  (стр. 104–105).

2. Построить графики зависимостей прогибов балки от нагрузки. Учитывая, что прогибы балки пропорциональны показаниям стрелочных тензометров, на вертикальной оси откладывать сумму приращений показаний прибора  $\Sigma \Delta n_i$ . На горизонтальной оси отложить сумму приращений нагрузки  $\Sigma \Delta F_i$ . Полученные точки соединить прямыми штриховыми отрезками, а затем провести сплошные прямые так, чтобы отклонения опытных точек были минимальными. Из графиков (рис. 27) очевидно, что зависимости прогибов балки от нагрузки действительно близки к прямым линиям. Поэтому можно сделать вывод о том, что закон Гука выполняется. Вблизи середины пролета (в точке  $S$ ) прогиб направлен вниз, а на консоли (в точке  $D$ ) – направлен вверх.

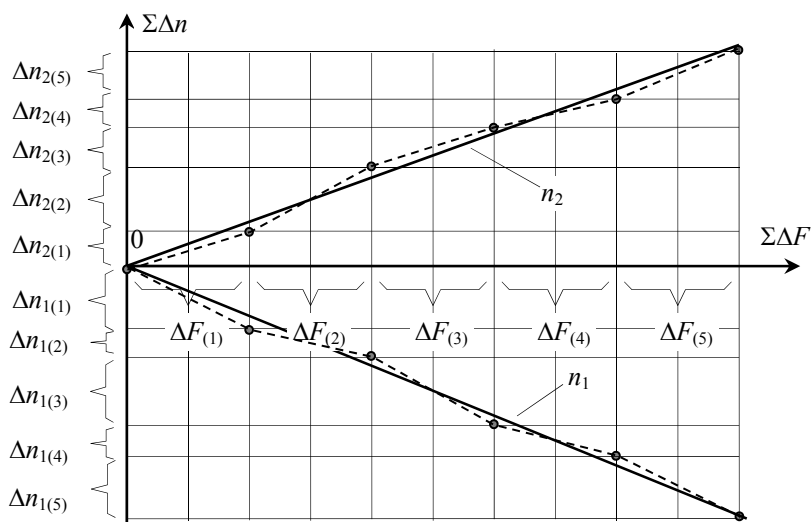


Рис. 27. Графики зависимости прогибов от нагрузки (в скобках указан номер ступени нагружения)

3. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки  $\Delta F_m$  и средние значения приращений показаний приборов  $\Delta n_{1m}, \Delta n_{2m}, \Delta n_{3m}, \Delta n_{4m}, \Delta n_{5m}, \Delta n_{6m}, \Delta n_{7m}, \Delta n_{8m}$  и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных (стр. 104–105).

$$\Delta F_m = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta F_k}{M}; \quad \Delta n_{im} = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta n_{i(k)}}{M}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (77)$$

где  $i$  – номер прибора;

$m$  – обозначение среднего значения;

$k$  – номер ступени загрузки;

$M$  – количество ступеней загрузки;

$N$  – количество измерительных приборов.

4. Вычислить средние значения углов поворота сечений на одной ступени нагружения на левой опоре балки и в ее пролете. Так как углы поворота сечений малы по сравнению с единицей, то справедливо приближенное равенство (рис. 28):

$$\theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{u_{\text{в}} - u_{\text{н}}}{d} = \frac{\Delta n_m^{\text{в}} \cdot a - \Delta n_m^{\text{н}} \cdot \alpha}{d} = \frac{(\Delta n_m^{\text{в}} - \Delta n_m^{\text{н}}) \cdot \alpha}{d}, \quad (78)$$

где  $u_{\text{в}}$ ,  $u_{\text{н}}$  – горизонтальные перемещения, соответственно, верхней и нижней точек стержня 13;

$\Delta n_m^{\text{в}}$ ,  $\Delta n_m^{\text{н}}$  – среднее приращение показаний верхнего и нижнего приборов, установленных на стержне 13;

$d$  – расстояние между верхним и нижним приборами на стержне 13.

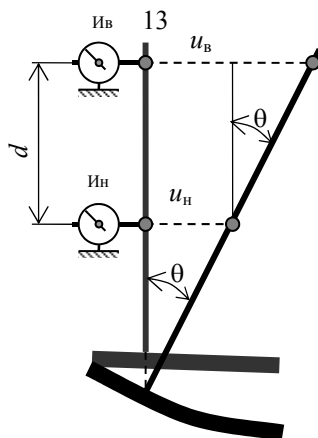


Рис. 28. Схема, поясняющая вычисление угла поворота сечения балки

5. Вычислить перемещение произвольной точки балки за счет осадок опор, предполагая, что балка остается прямолинейной. Согласно рис. 29, получим выражение:

$$V_z^{\text{оп}} = V_A^{\text{оп}} + z \cdot \text{tg}\alpha = V_A^{\text{оп}} + z \cdot \frac{V_B^{\text{оп}} - V_A^{\text{оп}}}{l}. \quad (79)$$

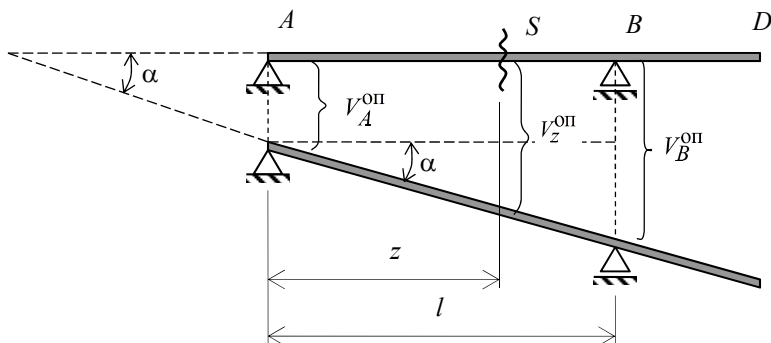


Рис. 29. Схема к определению перемещений точек балки, вызванных деформациями опор

Задавая соответствующие значения координате  $z$ , вычислить перемещения в точках  $S$  и  $D$ .

6. Вычислить опытные перемещения, включающие перемещения, вызванные деформациями опор балки:

$$V_S = \Delta n_{Sm} \cdot \alpha; \quad V_D = \Delta n_{Dm} \cdot \alpha. \quad (80)$$

7. Вычислить прогибы балки, то есть перемещения, вызванные только ее искривлением:

$$V_S^* = V_S - V_S^{\text{опоры}}; \quad V_D^* = V_D - V_D^{\text{опоры}}. \quad (81)$$

8. Вычислить относительные прогибы в расчетных точках балки  $\frac{V_S^*}{l}$  и  $\frac{V_D^*}{l}$ .

9. Вычислить реакции опор балки от среднего значения приращения нагрузки  $\Delta F$ . Для этого следует использовать уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \sum M_A = \Delta F \cdot a - Y_B \cdot (a + b) = 0; \quad Y_B = \Delta F_m \frac{a}{a + b}; \\ \sum M_B = Y_A \cdot (a + b) - \Delta F \cdot b = 0; \quad Y_A = \Delta F_m \frac{b}{a + b}. \end{aligned} \quad (82)$$

10. Для определения прогибов балки и углов поворота ее расчетных сечений использовать метод начальных параметров. Составим универсальное уравнение упругой оси балки по расчетной схеме (рис. 30):

$$EIV = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot z + \frac{Y_A(z-0)^3}{6} \Big|_I - \frac{\Delta F_m(z-a)^3}{6} \Big|_{II} + \frac{Y_B(z-a-b)^3}{6} \Big|_{III}; \quad (83)$$

$$EI\theta = EI\theta_0 + \frac{Y_A(z-0)^2}{2} \Big|_I - \frac{\Delta F_m(z-a)^2}{2} \Big|_{II} + \frac{Y_B(z-a-b)^2}{2} \Big|_{III}. \quad (84)$$

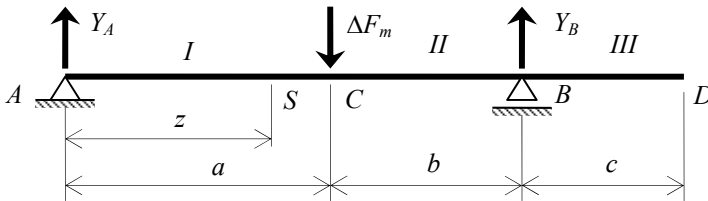


Рис. 30. Расчетная схема балки для определения прогибов и углов поворота

11. Определить начальные параметры универсального уравнения упругой изогнутой оси балки из условия ее закрепления. По условию закрепления балки на левой опоре  $A$  вычислить первый начальный параметр. При  $z = 0$  прогиб должен быть равным нулю  $V = 0$ :

$$EIV_A = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot 0 + \frac{Y_A(0-0)^3}{6} = 0. \quad (85)$$

Решение уравнения (85) дает значение  $EIV_0 = 0$ . Модуль упругости и осевой момент инерции поперечного сечения балки не равны нулю  $E \neq 0$  и  $I \neq 0$ . Отсюда следует, что первый начальный параметр равен нулю  $V_0 = 0$ .

По условию закрепления балки на правой опоре  $B$  определить второй начальный параметр. При  $z = a + b$  прогиб должен быть равен также нулю  $V = 0$ :

$$EIV_B = EI\theta_0 \cdot (a + b) + \frac{Y_A(a + b)^3}{6} \Big|_I - \frac{\Delta F_m(b)^3}{6} \Big|_{II} = 0. \quad (86)$$

Из полученного уравнения найти значение  $EI\theta_0$  и значение второго начального параметра  $\theta_0$ .

12. Используя универсальное уравнение упругой оси балки (83), вычислить прогибы балки в расчетных точках  $S$  и  $D$ , задавая соответствующие значения координате  $z$ .

13. Используя уравнение для углов поворота (84), определить углы поворота сечения на опоре  $A$  и расчетного сечения  $S$ .

14. Сравнить результаты, полученные при испытании балки, с теоретическим расчетом в форме табл. 6.

Таблица 6

Сравнение опытных и теоретических результатов

Величина	$\theta_A$	$\theta_S$	$V_S$ , мм	$V_D$ , мм
Опытные	$\theta_A^{\text{оп}}$	$\theta_S^{\text{оп}}$	$V_S^{\text{оп}}$	$V_D^{\text{оп}}$
Теоретические	$\theta_A^{\text{теор}}$	$\theta_S^{\text{теор}}$	$V_S^{\text{теор}}$	$V_D^{\text{теор}}$
Расхождение, %	$\frac{\theta_A^{\text{теор}} - \theta_A^{\text{оп}}}{\theta_A^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{\theta_S^{\text{теор}} - \theta_S^{\text{оп}}}{\theta_S^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{(V_S^{\text{теор}} - V_S^{\text{оп}})}{V_S^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{(V_D^{\text{теор}} - V_D^{\text{оп}})}{V_D^{\text{теор}}} \cdot 100$

Расхождение в прогибах и углах поворота вычислить как отношение результатов, полученных опытным путем и теоретически, деленное на теоретический результат. Если знаменатель равен нулю, то расхождение не вычисляется, и в соответствующей позиции таблицы ставится прочерк.

15. По полученным результатам сделать выводы.

Оформить отчет по лабораторной работе. Пример оформления отчета приведен в приложении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по охране труда. Кафедра «Математические методы в строительстве». – 2010.
2. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1986. – 560 с.
3. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов / М. Д. Подскребко. – Минск : Вышэйшая школа, 2007. – 949 с.
4. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов [и др.] ; под общ. ред. А. Ф. Смирнова. – М. : Высшая школа, 1975. – 480 с.
5. Сопротивление материалов : методические указания к лабораторным работам для студентов механических и технологических специальностей очной и заочной форм обучения / сост. : А. В. Дорожко, С. С. Макаревич. – Минск : БГТУ, 2008. – 45 с.
6. Сопротивление материалов (лабораторный практикум) / М. К. Балыкин [и др.]. – Минск, 1999. – 158 с.
7. Рубашкин, А. П. Лабораторные работы по сопротивлению материалов : учеб. пособие / А. П. Рубашкин. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 1971. – 240 с.
8. Металловедение и технология металлов / под ред. Ю. П. Солнцева. – М. : Metallургия, 1988. – 512 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Образцы оформления отчетов по лабораторным работам

#### Отчет по лабораторной работе № 1

### ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

#### Цель работы

1. Определить механические характеристики малоуглеродистой стали.
2. Установить марку стали и ее нормативные характеристики.

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

В соответствии со стандартом нагружение выполнять со скоростью 1 мм в минуту, не допускать перекосов и толчков, соблюдать технику безопасности.

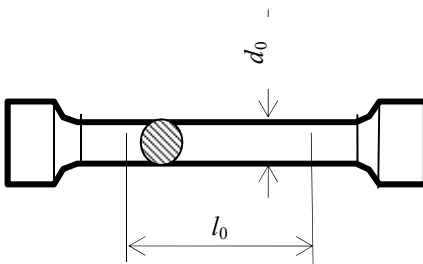
##### Испытательная машина

Разрывная машина.

##### Измерительные приборы и инструменты

Штангенциркуль и линейка.

**Схема образца до испытания и результаты измерения (короткий пятикратный образец):**



$$l_0 = 30 \text{ мм} \quad d_0 = 6 \text{ мм}$$

$$l_0 / d_0 = 5$$

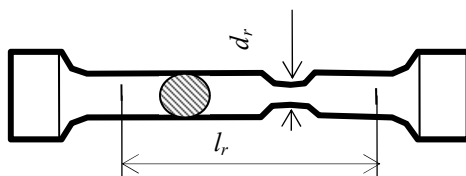
$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} = 28,27 \text{ мм}^2$$

#### Опытные данные

$$l_r = 41,0 \text{ мм}; \quad d_r = 2,6 \text{ мм}; \quad A_r = \frac{\pi d_r^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,6^2}{4} = 5,31 \text{ мм}^2.$$



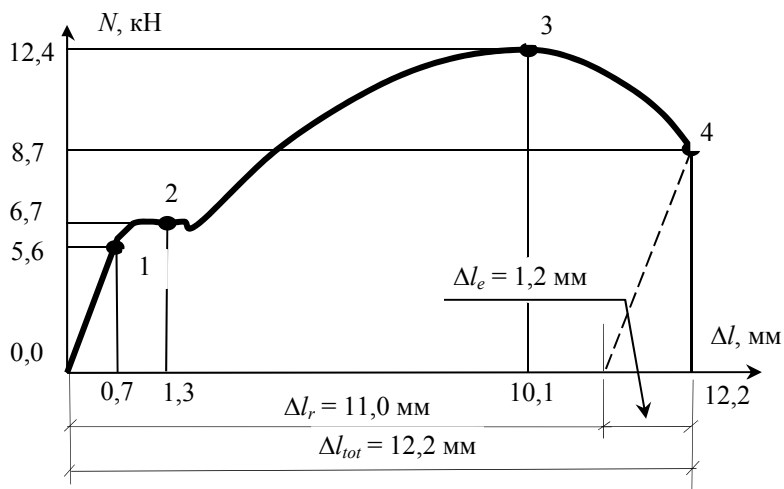
### Схема образца после испытания



### Усилия и деформации в характерных точках диаграммы растяжения

1	2	3	4
$N_{pr} = 5,6 \text{ кН}$	$N_y = 6,7 \text{ кН}$	$N_u = 12,4 \text{ кН}$	$N_0 = 8,7 \text{ кН}$
$\Delta l_{pr} = 0,7 \text{ мм}$	$\Delta l_y = 1,3 \text{ мм}$	$\Delta l_u = 10,1 \text{ мм}$	$\Delta l_{tot} = 12,2 \text{ мм}$

### Машинная диаграмма растяжения



## Результаты испытания

**Деформации в характерных точках диаграммы напряжений:**

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_{pr}}{l_0} = \frac{0,7}{30} = 0,023; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_y}{l_0} = \frac{1,3}{30} = 0,043;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta l_u}{l_0} = \frac{10,1}{30} = 0,337; \quad \varepsilon_4 = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{12,2}{30} = 0,407.$$

### Характеристики прочности

Предел пропорциональности:

$$\sigma_{pr} = \frac{N_{pr}}{A_0} = \frac{5,6 \cdot 10^3}{28,27 \cdot 10^{-6}} = 198 \text{ МПа.}$$

Предел текучести:

$$\sigma_Y = \frac{N_Y}{A_0} = \frac{6,7 \cdot 10^3}{28,27 \cdot 10^{-6}} = 237 \text{ МПа.}$$

Предел прочности:

$$\sigma_U = \frac{N_U}{A_0} = \frac{12,4 \cdot 10^3}{28,27 \cdot 10^{-6}} = 439 \text{ МПа.}$$

### Характеристики пластичности

Относительное остаточное удлинение:

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{41 - 30}{30} \cdot 100 = 37 \text{ \%}.$$

Относительное остаточное сужение:

$$\chi_r = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100 = \frac{28,27 - 5,31}{28,27} \cdot 100 = 81 \%$$

### Удлинение к моменту разрыва

Полное  $\Delta l_{tot} = 12,2$  мм.

Упругое  $\Delta l_e = 1,2$  мм.

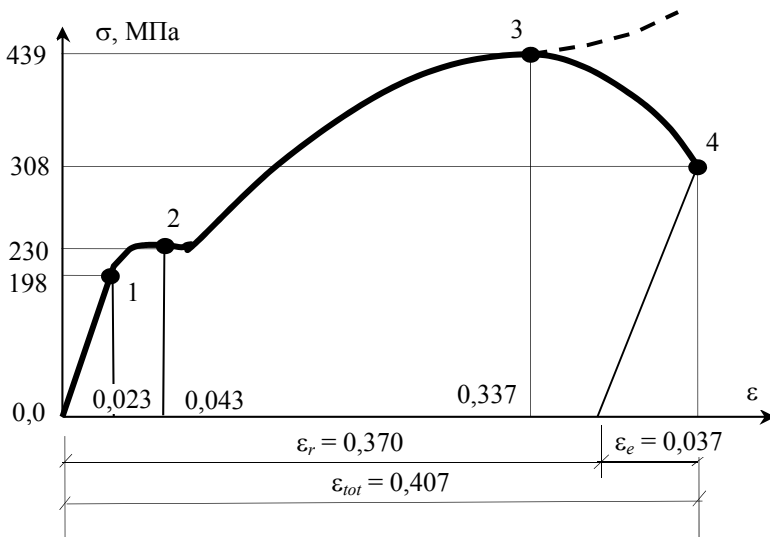
Остаточное  $\Delta l_r = 11,0$  мм.

### Напряжения в момент разрыва

Условное:  $\sigma_0 = \frac{N_0}{A_0} = \frac{8,7 \cdot 10^3}{28,27 \cdot 10^{-6}} = 308$  МПа.

Истинное:  $\sigma'_0 = \frac{N_0}{A_r} = \frac{8,7 \cdot 10^3}{5,31 \cdot 10^{-6}} = 1638$  МПа.

### Диаграмма напряжений



## Определение допускаемого напряжения

$$[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n} = \frac{\sigma_y}{n} = \frac{237}{1,5} = 158 \text{ МПа.}$$

### Выводы

Определены характеристики прочности и пластичности стали, допускаемое напряжение составляет 158 МПа.

Работу выполнил

Преподаватель

\_\_\_\_\_  
Дата \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Отчет по лабораторной работе № 2

### ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

#### Цель работы

1. Изучить опытные зависимости между сжимающим усилием и деформацией образцов из чугуна, стали и древесины.

2. По результатам испытаний определить механические характеристики прочности и пластичности, а для образцов из хрупких материалов и допускаемое напряжение.

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

В соответствии со стандартом нагружение выполнять со скоростью 1 мм в минуту, не допускать перекосов и толчков, соблюдать технику безопасности.

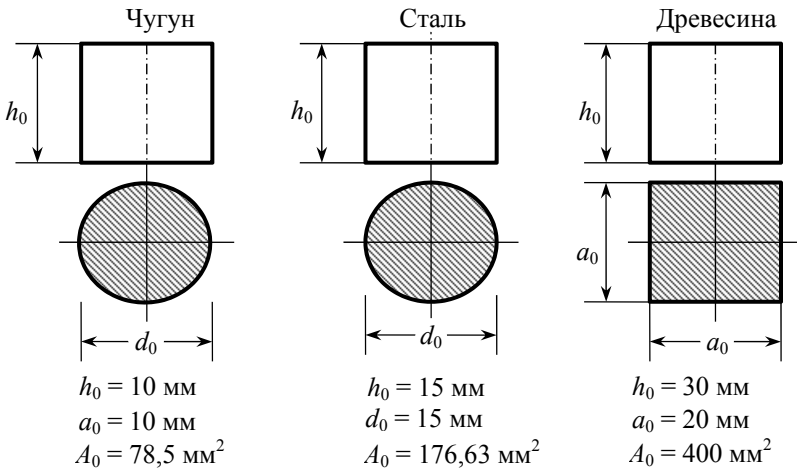
##### Испытательная машина

Гидравлический пресс.

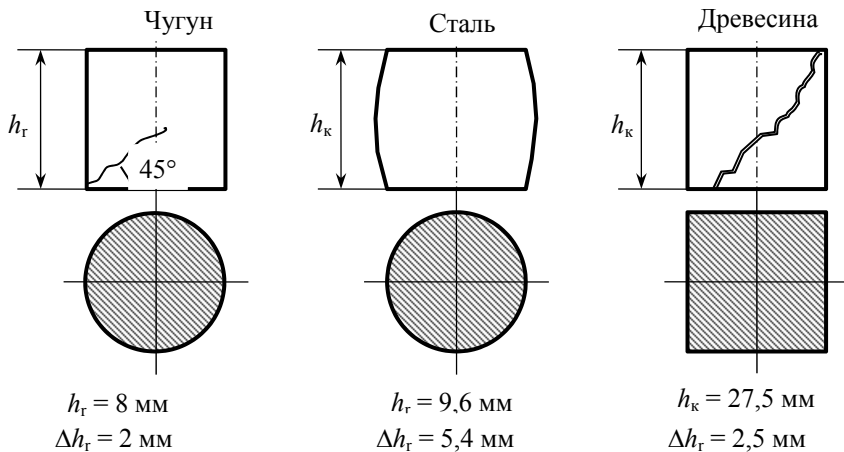
##### Измерительные приборы и инструменты

Штангенциркуль и линейка.

##### Схема образцов до испытания



## Схема образца после испытания



Усилия предела прочности:

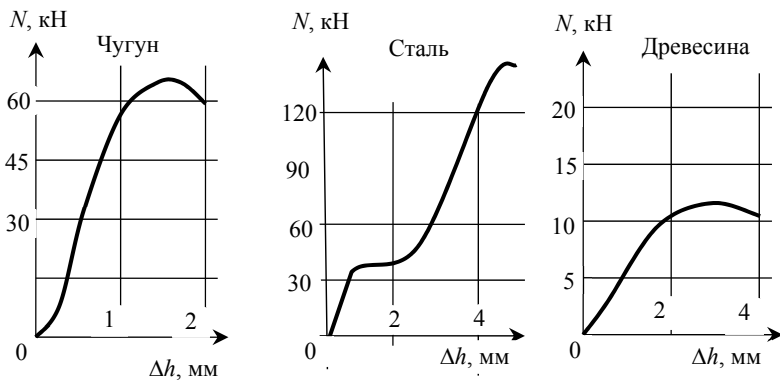
– для чугунного образца  $N_u = 79,2 \text{ кН}$ ;

– для образца из древесины  $N_u = 11,6 \text{ кН}$ .

Усилия предела текучести стального образца  $N_y = 43,2 \text{ кН}$ .

Максимальное усилие испытания для стали  $N_{\max} = 142,4 \text{ кН}$ .

## Диаграммы сжатия образцов



## Результаты испытания

### Характеристики прочности и пластичности

Для образца из чугуна предел прочности:

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0} = \frac{79,2 \cdot 10^3}{78,5 \cdot 10^{-6}} = 1009 \text{ МПа},$$

относительное остаточное укорочение:

$$\varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \cdot 100 = \frac{10,0 - 8,0}{10,0} \cdot 100 = 20 \text{ \%}.$$

Для образца из древесины предел прочности:

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0} = \frac{11,6 \cdot 10^3}{400,0 \cdot 10^{-6}} = 29,0 \text{ МПа},$$

относительное остаточное укорочение:

$$\varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \cdot 100 = \frac{30,0 - 27,5}{30,0} \cdot 100 = 8 \text{ \%}.$$

Для образца из стали предел текучести:

$$\sigma_y = \frac{N_y}{A_0} = \frac{43,2 \cdot 10^3}{176,6 \cdot 10^{-6}} = 245 \text{ МПа},$$

максимальное условное напряжение:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} = \frac{142,4 \cdot 10^3}{176,6 \cdot 10^{-6}} = 806 \text{ МПа},$$

относительное остаточное укорочение при максимальной нагрузке:

$$\varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \cdot 100 = \frac{15,0 - 9,6}{15,0} \cdot 100 = 36,0 \text{ \%}.$$

### Допускаемые напряжения

Для образца из чугуна:

$$[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n} = \frac{\sigma_u}{n} = \frac{1009}{3} = 336,3 \text{ МПа,}$$

для образца из древесины:

$$[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n} = \frac{\sigma_u}{n} = \frac{29}{3} = 9,7 \text{ МПа.}$$

### Выводы

По результатам испытания хрупких (чугун, древесина) и пластического (сталь) материалов установлено, что диаграммы хрупких материалов не имеют площадок текучести.

Установлены механические характеристики для чугуна, стали и древесины.

Работу выполнил

Преподаватель

\_\_\_\_\_  
Дата \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## Отчет по лабораторной работе № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

#### Цель работы

1. Подтвердить закон Гука.
2. Определить модуль продольной упругости и коэффициент поперечной деформации.

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

Максимальная сила растяжения не должна вызывать пластических деформаций стали. Нагружение выполнять равными ступенями.

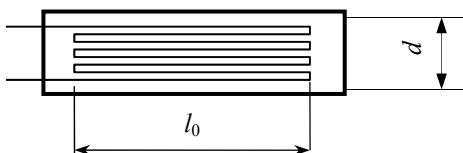
##### Испытательная машина

Разрывная машина.

##### Измерительные приборы и инструменты

Штангенциркуль, стальная линейка и измеритель деформаций ИДЦ.

##### Схема датчика (тензорезистора)

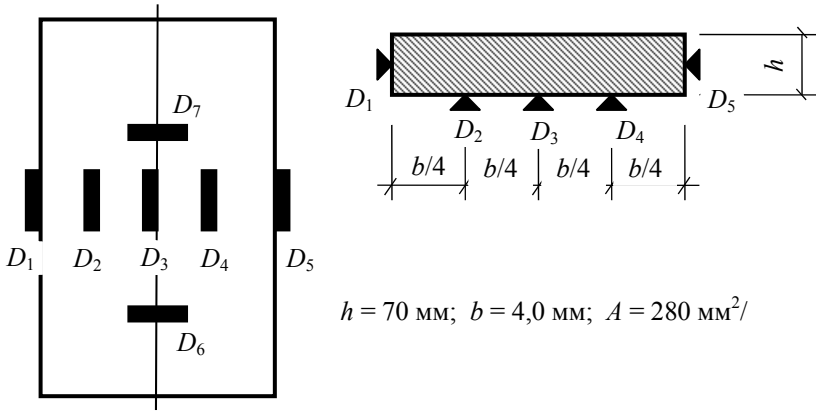


$$l_0 = 3 \text{ см};$$

$$d = 0,5 \text{ см};$$

$$K = 2,07.$$

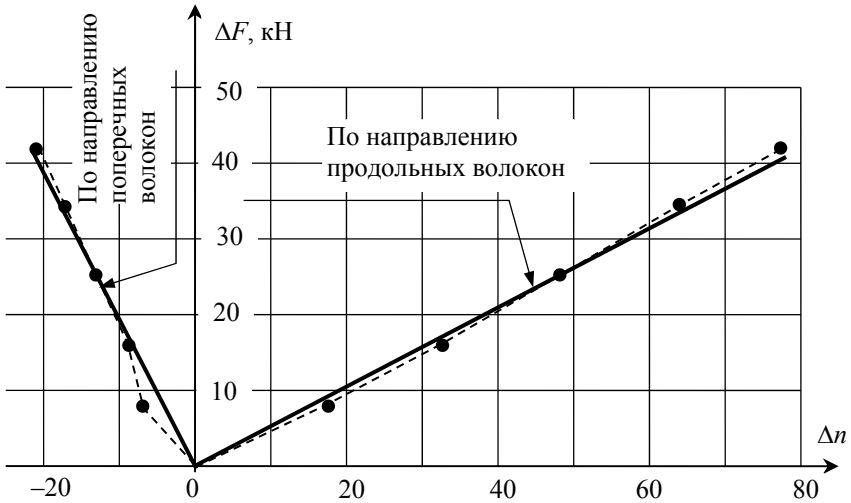
## Схема образцов с датчиками



### Таблица опытных данных

Датчик	Д <sub>1</sub>		Д <sub>2</sub>		Д <sub>3</sub>		Д <sub>4</sub>		Д <sub>5</sub>		Д <sub>6</sub>		Д <sub>7</sub>			
	F, кН	$\Delta F$	n	$\Delta n_1$	n	$\Delta n_2$	n	$\Delta n_3$	n	$\Delta n_4$	n	$\Delta n_5$	n	$\Delta n_6$	n	$\Delta n_7$
0			675		687		630		618		636		649		640	
		8,4		19		18		18		19		18		-6		-7
8,4			694		705		648		637		654		643		633	
		8,4		15		20		15		13		15		-4		-2
16,8			709		725		663		650		669		639		631	
		8,4		16		10		15		15		15		-3		-4
25,2			725		735		678		665		684		636		627	
		8,4		15		15		15		15		15		-4		-4
33,6			740		750		693		680		699		632		623	
		8,4		14		15		15		16		15		-4		-4
42,0			754		765		708		696		714		628		619	
Сред- нее	$\Delta F_m =$ 8,4		$\Delta n_{m1} =$ 15,8		$\Delta n_{m2} =$ 15,6		$\Delta n_{m3} =$ 15,6		$\Delta n_{m4} =$ 15,6		$\Delta n_{m5} =$ 15,6		$\Delta n_{m6} =$ -4,2		$\Delta n_{m7} =$ -4,2	

## График деформаций в продольном и поперечном направлениях



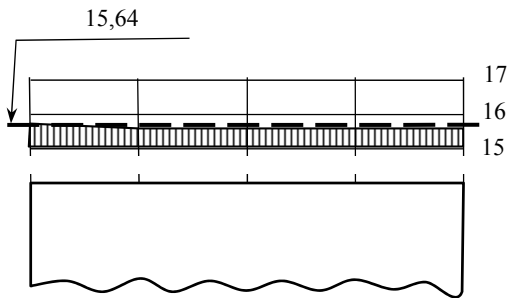
Среднее приращение отсчетов (по  $D_1 \dots D_5$ )

$$\Delta n_m = \frac{15,8 + 15,6 + 15,6 + 15,6 + 15,6}{5} = 15,64.$$

Среднее приращение отсчетов (по  $D_6 \dots D_7$ )

$$\Delta n'_m = \frac{-4,2 - 4,2}{2} = -4,2.$$

Эпюра деформаций в поперечном сечении образца



**Наибольшее отклонение деформаций от среднего значения**

$$15,8 - 15,64 = 0,16.$$

**Результаты испытания**

**Максимальное напряжение в образце**

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} = \frac{42,0 \cdot 10^3}{280 \cdot 10^{-6}} = 150 \text{ МПа.}$$

**Напряжение от ступени нагрузки  $\Delta N = \Delta F_m = 8,4 \text{ кН}$**

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta N}{A_0} = \frac{8,4 \cdot 10^3}{280 \cdot 10^{-6}} = 30 \text{ МПа.}$$

**Относительная продольная деформация ( $D_1 \dots D_5$ )**

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{2 \cdot \Delta n_m \cdot \alpha}{K} = \frac{2 \cdot 15,64 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2,07} = 0,15 \cdot 10^{-3}.$$

**Относительная поперечная деформация ( $D_6 \dots D_7$ )**

$$\Delta\varepsilon'_m = \frac{2 \cdot \Delta n'_m \cdot \alpha}{K} = \frac{2 \cdot (-4,2 \cdot 1 \cdot 10^{-5})}{2,07} = -0,041 \cdot 10^{-3}.$$

**Коэффициент поперечной деформации**

$$\nu = \left| \frac{\Delta\varepsilon'_m}{\Delta\varepsilon_m} \right| = \left| \frac{-0,041}{0,15} \right| = 0,27.$$

## Модуль продольной упругости

$$E = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_m} = \frac{30 \cdot 10^6}{0,15 \cdot 10^{-3}} = 200 \text{ ГПа.}$$

### Выводы

Сталь деформируется по закону Гука, выполняется гипотеза плоских сечений, установлены значения модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации.

Работу выполнил

Преподаватель

Дата \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Отчет по лабораторной работе № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ВТОРОГО РОДА (МОДУЛЯ СДВИГА)

#### Цель работы

1. Определить опытным путем модуль сдвига.
2. Подтвердить закон Гука при кручении и теоретическую зависимость модуля продольной упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона.

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

Плавное нагружение стержня, точность положения измерительных приборов.

##### Испытательная установка

Настольная установка.

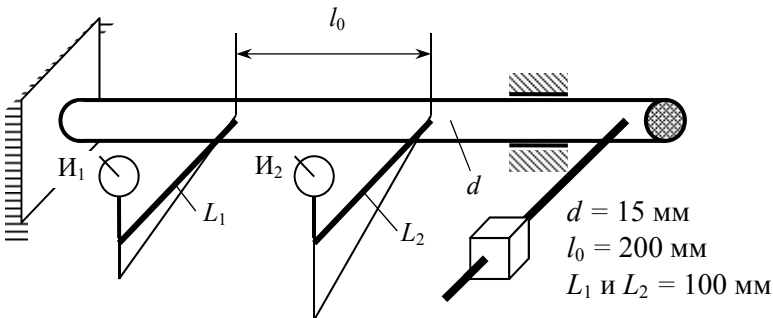
##### Материал образца

Сталь.

##### Измерительные приборы и инструменты

Штангенциркуль, линейка, стрелочные тензометры (индикаторы) с ценой деления  $\alpha = 0,01$  мм.

##### Схема опытной установки



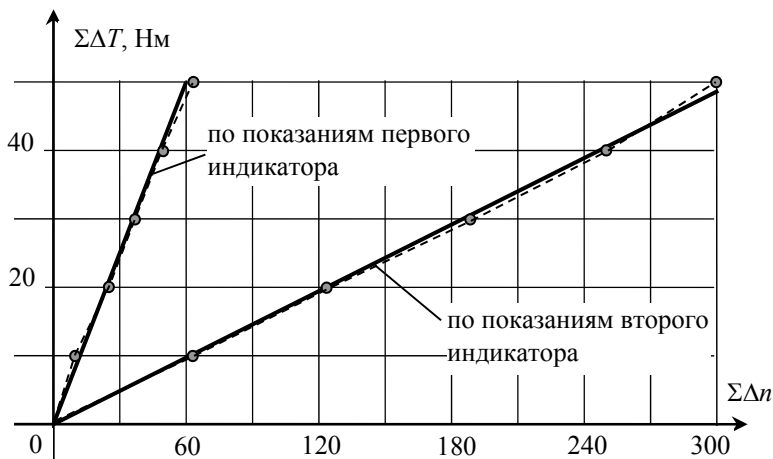
## Геометрические характеристики поперечного сечения

$$I_P = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{3,14 \cdot 1,5^4}{32} = 0,497 \text{ см}^4;$$

$$W_P = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{3,14 \cdot 1,5^3}{16} = 0,662 \text{ см}^3.$$

**Таблица опытных данных**

Нагрузка, Нм		Индикаторы			
		И <sub>1</sub>		И <sub>2</sub>	
<i>T</i>	$\Delta T$	<i>n</i>	$\Delta n$	<i>n</i>	$\Delta n$
30		0		0	
	10		11		63
40		11		63	
	10		14		62
50		25		125	
	10		12		63
60		37		188	
	10		13		61
70		50		249	
	10		13		64
80		63		313	
Среднее	$\Delta T_m = 10$	$\Delta n_{1m} = 12,6$		$\Delta n_{2m} = 62,6$	



### Результаты испытания

#### Максимальное касательное напряжение в образце

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_P} = \frac{50,0}{0,662 \cdot 10^{-6}} = 75,5 \text{ МПа} < 0,55 \cdot \sigma_{pr} = 0,55 \cdot 200 = 110 \text{ МПа}.$$

#### Среднее приращение угла поворота сечения 1

$$\Delta\theta_{1m} = \frac{\Delta V_{1m}}{L} = \frac{\Delta n_{1m} \cdot \alpha}{L} = \frac{12,6 \cdot 0,01}{100} = 1,26 \cdot 10^{-3}.$$

#### Среднее приращение угла поворота сечения 2

$$\Delta\theta_{2m} = \frac{\Delta V_{2m}}{L} = \frac{\Delta n_{2m} \cdot \alpha}{L} = \frac{62,6 \cdot 0,01}{100} = 6,26 \cdot 10^{-3}.$$

#### Среднее приращение угла закручивания участка образца

$$\Delta\theta_{21m} = \Delta\theta_{2m} - \Delta\theta_{1m} = 6,26 \cdot 10^{-3} - 1,26 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3}.$$



### Из закона Гука

$$\Delta\theta = \frac{\Delta T \cdot l_0}{G \cdot I_P}$$

вычисляется значение модуля сдвига

$$G^{\text{оп}} = \frac{\Delta T \cdot l_0}{\Delta\theta_{21m} \cdot I_P} = \frac{10 \cdot 200 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,497 \cdot 10^{-8}} = 80,5 \text{ ГПа.}$$

### Значение модуля сдвига из теоретической зависимости

$$G^{\text{теор}} = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{200}{2 \cdot (1+0,3)} = 77 \text{ ГПа.}$$

### Расхождение значений модуля упругости

$$\frac{80,5 - 77}{77} \cdot 100 = 4,7 \%$$

### В ы в о д ы

Согласно графику, при кручении материал образца деформируется по закону Гука. Подтверждается теоретическая зависимость между модулем продольной упругости, модулем сдвига и коэффициентом Пуассона.

Работу выполнил

Преподаватель

Дата \_\_\_\_\_

## Отчет по лабораторной работе № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

#### Цель работы

1. По результатам опыта установить закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки.
2. Подтвердить справедливость закона Гука и гипотезу плоских сечений при плоском изгибе тонких балок.

#### Исходные данные

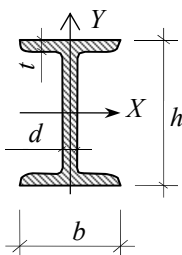
##### Требования к испытанию

Отсутствие перекосов, плавность нагружения.

##### Опытная установка

Двутавровая балка опирается на две шарнирные опоры. Имеет консоль. Нагружается гидравлическим домкратом, закрепленным на составной швеллерной балке.

**Объект исследования** (требуется изобразить поперечное сечение балки и привести данные):



Двутавр № 16

$$h = 160 \text{ мм}; d = 5 \text{ мм};$$

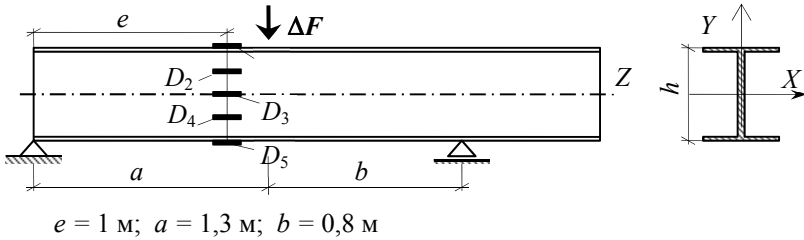
$$I_x = 873 \text{ см}^4; W_x = 109 \text{ см}^4;$$

$$E = 206 \text{ ГПа}.$$

##### Измерительные приборы

ИДЦ  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $K = 2$ ; тензодатчики  $l_0 = 2 \text{ см}$ ; стальная лента и штангенциркуль.

## Схема опытной балки

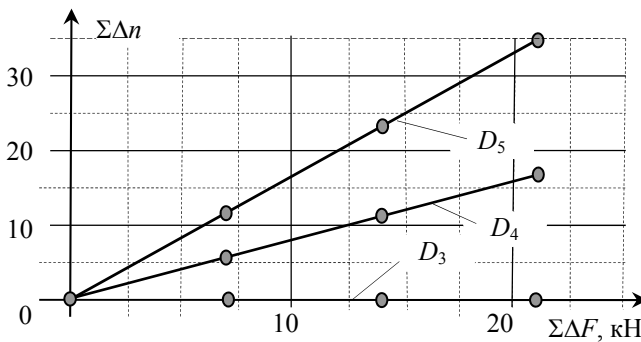


## Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка, кН		Д <sub>1</sub>		Д <sub>2</sub>		Д <sub>3</sub>		Д <sub>4</sub>		Д <sub>5</sub>	
<i>F</i>	$\Delta F$	$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$	$n_4$	$\Delta n_4$	$n_5$	$\Delta n_5$
10,0		945		1070		906		1034		1113	
	6,9		-11		-6		0		5		11
16,9		934		1064		906		1039		1124	
	6,9		-12		-6		0		6		12
23,8		922		1058		906		1045		1136	
	6,9		-12		-5		0		6		12
30,7		910		1053		906		1051		1148	
$\Delta F_m = 6,9$		$\Delta n_{m1} = -11,7$		$\Delta n_{m2} = -5,7$		$\Delta n_{m3} = 0$		$\Delta n_{m4} = 5,7$		$\Delta n_{m5} = 11,7$	

## Графики зависимости относительной линейной деформаций от нагрузки



## Результаты испытания

### Относительные деформации

$$\varepsilon_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta n_{m1} \alpha}{K} = \frac{2 \cdot (-11,7) \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2} = -0,117 \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_{m2} = \frac{2 \cdot \Delta n_{m2} \alpha}{K} = \frac{2 \cdot (-5,7) \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2} = -0,057 \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_{m3} = 0;$$

$$\varepsilon_{m4} = \frac{2 \cdot \Delta n_{m4} \alpha}{K} = \frac{2 \cdot 5,7 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2} = 0,057 \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_{m5} = \frac{2 \cdot \Delta n_{m5} \alpha}{K} = \frac{2 \cdot 11,7 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2} = 0,117 \cdot 10^{-3}.$$

### Нормальные напряжения в исследуемых точках сечения по результатам опыта

$$\sigma_{m1} = E\varepsilon_{m1} = 206 \cdot 10^9 \cdot (-0,117 \cdot 10^{-3}) = -24,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{m2} = E\varepsilon_{m2} = 206 \cdot 10^9 \cdot (-0,057 \cdot 10^{-3}) = -11,7 \text{ МПа};$$

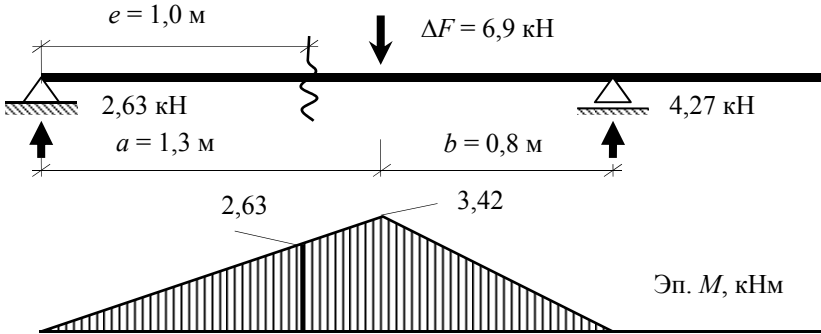
$$\sigma_{m3} = E\varepsilon_{m3} = 206 \cdot 10^9 \cdot 0,0 = 0,0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{m4} = E\varepsilon_{m4} = 206 \cdot 10^9 \cdot 0,057 \cdot 10^{-3} = 11,7 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{m5} = E\varepsilon_{m5} = 206 \cdot 10^9 \cdot 0,117 \cdot 10^{-3} = 24,1 \text{ МПа}.$$

## Теоретический расчет

### Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов



### Нормальные напряжения в исследуемых точках сечения балки

$$\sigma_1 = \frac{M_X}{I_X} y_1 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot (-8 \cdot 10^{-2}) = -24,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = \frac{M_X}{I_X} y_2 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot (-4 \cdot 10^{-2}) = -12,0 \text{ МПа};$$

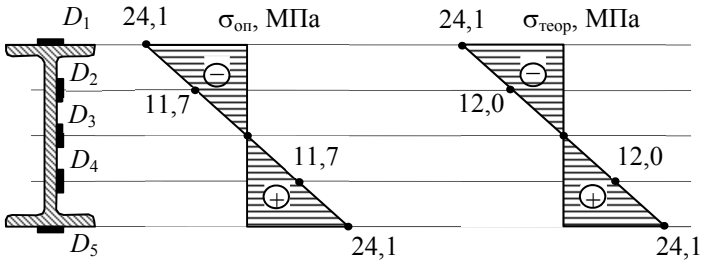
$$\sigma_3 = \frac{M_X}{I_X} y_3 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0 = 0;$$

$$\sigma_4 = \frac{M_X}{I_X} y_4 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 12,0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_5 = \frac{M_X}{I_X} y_5 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot 8 \cdot 10^{-2} = 24,1 \text{ МПа}.$$

## Сравнение результатов

### Эпюры нормальных напряжений



### Сравнения результатов опыта и теоретического расчета

Напряжения	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$
Опытные, МПа	-24,1	-11,7	0	11,7	24,1
Теоретические, МПа	-24,1	-12,0	0	12,0	24,1
Расхождение, %	0	2,5	—	2,5	0

### В ы в о д ы

В результате опытных и теоретических исследований установлено, что опытные и теоретические значения нормальных напряжений практически совпадают. Отличие не превышает 2,5 %. Следовательно, теория тонких балок справедлива.

Работу выполнил \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

## Отчет по лабораторной работе № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

#### Цель работы

1. Установить вид напряженного состояния в расчетных точках балки и сравнить результаты испытания и теоретического расчета.

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

Отсутствие перекосов нагрузки и установки приборов.

##### Опытная установка

Балочный испытатель.

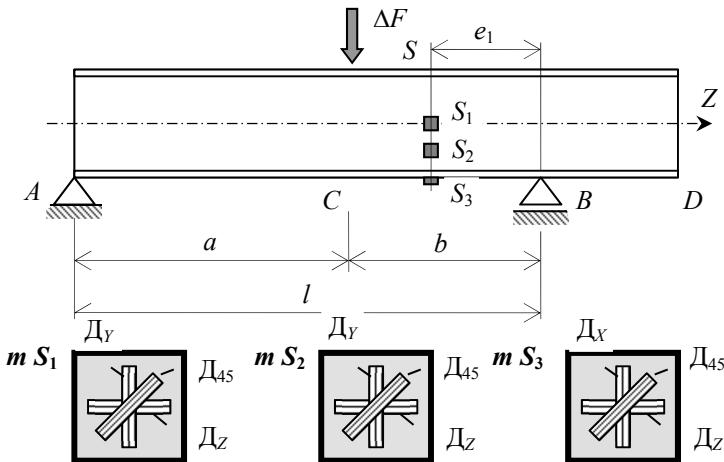
##### Объект исследования

Стальной прокатный двутавр № 16,  
 $h = 160$  мм;  $d = 5$  мм;  $I_x = 873$  см<sup>4</sup>;  $W_x = 109$  см<sup>4</sup>;  $E = 206$  ГПа.

##### Измерительные приборы

ИДЦ  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $K = 2$ ; тензодатчики  $l_0 = 2$  см; стальная лента и штангенциркуль.

##### Схема опытной балки

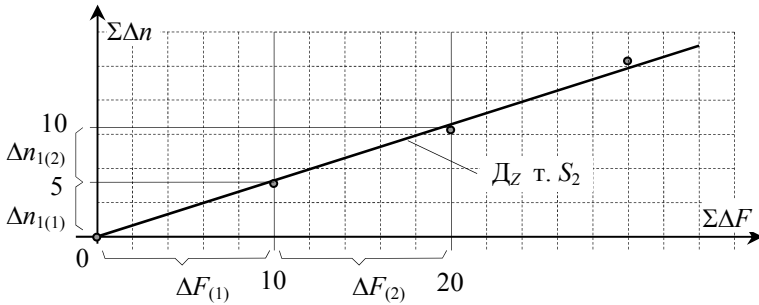


## Опытные данные

**Таблица опытных данных**

Точки		$S_1$						$S_2$					
Датчики		$D_Z$		$D_Y$		$D_{45}$		$D_Z$		$D_Y$		$D_{45}$	
$F$ , кН	$\Delta F$ , кН	$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$	$n_4$	$\Delta n_4$	$n_5$	$\Delta n_5$	$n_6$	$\Delta n_6$
10		1001		965		1013		984		1001		965	
	10		0		1		5		5		1		9
20		1001		966		1017		989		1002		974	
	10		-1		-1		6		4		0		9
30		1000		965		1023		993		1002		983	
$\Delta F_m = 10$		$\Delta n_{1m} = 0$		$\Delta n_{2m} = 0$		$\Delta n_{3m} = 5$		$\Delta n_{4m} = 5$		$\Delta n_{5m} = 0$		$\Delta n_{6m} = 9$	

**Графики зависимости относительной деформаций от нагрузки**



**Результаты испытания**

Величина	Точка $S_1$	Точка $S_2$	Величина	Точка $S_1$	Точка $S_2$
$\varepsilon_y(\varepsilon_{1m}) \times 10^5$	0	4,88	$\varepsilon_{\min} \times 10^5$	-4,88	-4,36
$\varepsilon_z(\varepsilon_{2m}) \times 10^5$	0	0	$\sigma_{\max}$ , МПа	7,73	17,94
$\varepsilon_{45}(\varepsilon_{3m}) \times 10^5$	4,88	8,78	$\sigma_{\min}$ , МПа	-7,73	-3,59
$\gamma_{yz} \times 10^5$	-9,76	1,27	$\tau_{\max}$ , МПа	7,73	10,77
$\varepsilon_{\max} \times 10^5$	4,88	17,94	$\alpha_0$ , град	45	21,1

Для определения опытных деформаций, напряжений и угла поворота главных площадок использованы формулы (57), (58), (59), (60), (61) и (62).



## Теоретический расчет

### Реакции опор балки

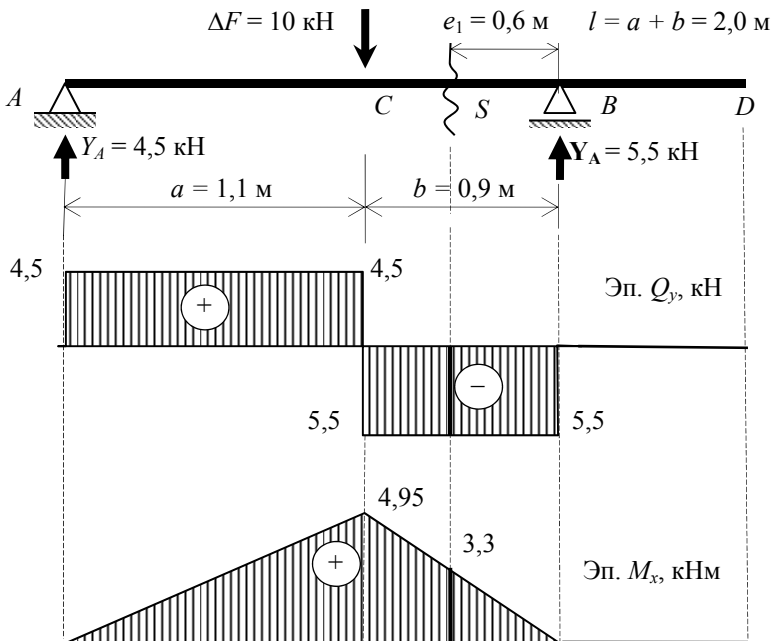
$$Y_A = \Delta F \cdot \frac{b}{a+b} = 10 \cdot \frac{0,9}{1,1+0,9} = 4,5 \text{ кНМ};$$

$$Y_B = \Delta F \cdot \frac{a}{a+b} = 10 \cdot \frac{1,1}{1,1+0,9} = 5,5 \text{ кНМ}.$$

### Изгибающий момент и поперечная сила в расчетном сечении $S$

$$M_{xS} = Y_B \cdot e_1 = 5,5 \cdot 0,6 = 3,3 \text{ кНМ}; \quad Q_{yS} = Y_B = 5,5 \text{ кН}.$$

### Расчетная схема балки и эпюры внутренних сил



## Результаты теоретического расчета

Для вычисления теоретических значений напряжений и угла поворота главных площадок использованы формулы (67), (68), (69), (70), (71) и (72).

Результаты теоретического расчета приведены в таблице.

Величина	Точка $S_1$	Точка $S_2$	Величина	Точка $S_1$	Точка $S_2$
$\sigma_z$ , МПа	0	15,12	$\sigma_{\max}$ , МПа	7,85	18,10
$S_X^0$ , МПа	62,30	58,30	$\sigma_{\min}$ , МПа	-7,85	-2,98
$\tau_{yz}$ , МПа	7,85	7,35	$\alpha_0$ , град	45	22,09
$\tau_{\max}$ , МПа	7,85	10,54	–	–	–

## Сравнение результатов

Отличие напряжений и углов поворота главных площадок опытных и теоретических результатов выражено в процентах и приведено в таблице.

Точки	$S_1 (S_2)$				$S_2$			
	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\tau_{\max}$ , МПа	$\alpha_0$ , град	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\tau_{\max}$ , МПа	$\alpha_0$ , град
Опытные	7,73	-7,73	7,73	45	17,94	-3,59	10,77	21,10
Теоретические	7,85	-7,85	7,85	45	18,10	-2,98	10,54	22,09
Отличие, %	1,53	1,53	1,53	0	1,28	20,47	2,18	4,48

## Выводы

В результате опытных и теоретических исследований установлено, что материал деформируется в упругой стадии и по закону Гука. Сравнение результатов испытания и теоретических расчетов показало, что их отличие не превышает 5 % за исключением меньшего экстремального напряжения в точке  $S_2$ .

Работу выполнил

Преподаватель

Дата \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Отчет по лабораторной работе № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

#### Цель работы

1. Проверить достоверность обобщенного уравнения оси изогнутой балки (метод начальных параметров). Подтвердить пропорциональность зависимости прогибов от нагрузки (закон Гука).

#### Исходные данные

##### Требования к испытанию

Нагрузка на балку статическая, равно ступенчатая. Наибольший относительный прогиб не должен превышать допустимого значения ( $v_{\max}/l \leq 1/400$ ).

##### Используемые формулы

Универсальное уравнение упругой оси и уравнение углов поворота сечений балки:

$$EIV = EIV_0 + EI\theta_0 z + \frac{y_A(z-0)^3}{6} - \Delta F \frac{(z-a)^3}{6} + \frac{y_B(z-l)^3}{6};$$
$$EI\theta = EI\theta_0 + \frac{y_A(z-0)^2}{2} - \Delta F \frac{(z-a)^2}{2} + \frac{y_B(z-l)^2}{2}.$$

##### Опытная установка

Балочный испытатель.

##### Объект исследования

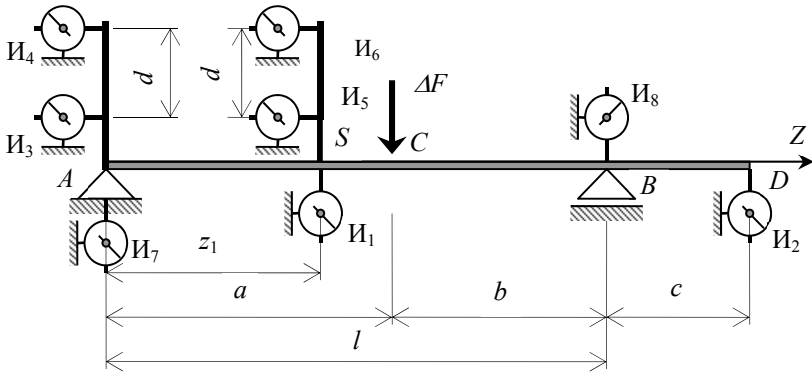
Стальная двутавровая балка № 22,

$I_x = 2550 \text{ см}^4$  ( $E = 206 \text{ ГПа}$ ).

##### Измерительные приборы

Стрелочный тензометр (цена деления  $\alpha = 0,01 \text{ мм}$ ), стальная лента.

### Схема опытной балки



$a = 1,5$  м;  $b = 0,9$  м;  $c = 0,7$  м;  $l = 2,4$  м;  $z_1 = 1,245$  м;  $d = 0,22$  м.

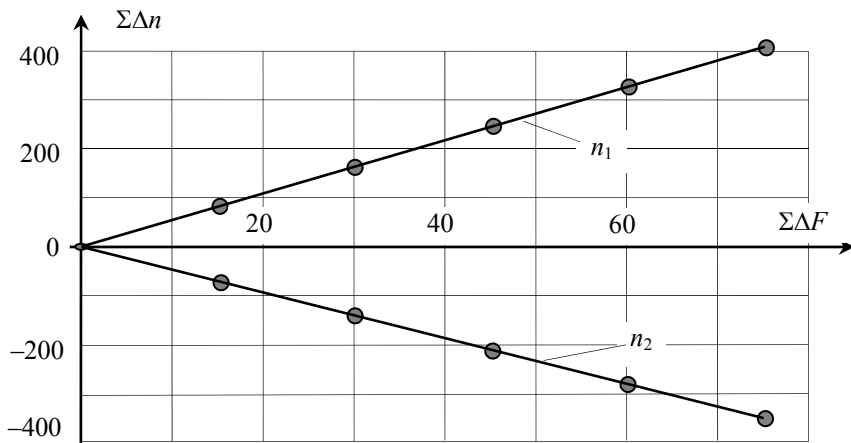
### Таблица опытных данных

Индикаторы		И <sub>1</sub>		И <sub>2</sub>		И <sub>3</sub>		И <sub>4</sub>	
$F$ , кН	$\Delta F$ , кН	$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$	$n_4$	$\Delta n_4$
0		0		0		0		0	
	15		86		-73		24		52
15		86		-73		24		52	
	15		79		-68		20		47
30		165		-141		44		99	
	15		82		-70		21		47
45		247		-211		65		146	
	15		78		-67		21		47
60		325		-278		86		193	
	15		83		-65		22		47
75		408		-343		108		240	
Сред- нее	$\Delta F_m = 15$	$\Delta n_{1m} = 81,6$		$\Delta n_{2m} = -68,6$		$\Delta n_{3m} = 21,6$		$\Delta n_{4m} = 48,0$	

Продолжение таблицы опытных данных

Индикаторы		И <sub>5</sub>		И <sub>6</sub>		И <sub>7</sub>		И <sub>8</sub>	
<i>F</i> , кН	$\Delta F$ , кН	<i>n</i> <sub>5</sub>	$\Delta n_5$	<i>n</i> <sub>6</sub>	$\Delta n_6$	<i>n</i> <sub>7</sub>	$\Delta n_7$	<i>n</i> <sub>8</sub>	$\Delta n_8$
0		0		0		0		0	
	15		13		13		1		3
15		13		13		1		3	
	15		13		14		1		5
30		26		27		2		8	
	15		14		13		2		4
45		40		40		4		12	
	15		14		15		2		5
60		54		55		6		17	
	15		13		12		2		5
75		67		67		8		22	
Среднее	$\Delta F_m = 15$	$\Delta n_{5m} = 13,4$		$\Delta n_{6m} = -13,4$		$\Delta n_{7m} = 1,6$		$\Delta n_{8m} = 4,4$	

График деформации



## Результаты испытания

**Угол поворота опорного сечения А (при  $z = 0$ )**

$$\theta_A = \frac{(\Delta n_{4m} - \Delta n_{3m}) \cdot \alpha}{d} = \frac{(48,0 - 21,6) \cdot 10^{-5}}{0,22} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ рад.}$$

**Угол поворота сечения S (при  $z = z_1 = 1,245$  м)**

$$\theta_S = \frac{(\Delta n_{6m} - \Delta n_{5m}) \cdot \alpha}{d} = \frac{(13,4 - 13,4) \cdot 10^{-5}}{0,22} = 0.$$

**Перемещения за счет осадки опор**

**1) сечения S (при  $z = z_1 = 1,245$  м):**

$$\begin{aligned} \Delta V_S &= (\Delta n_{7m} + \frac{\Delta n_{8m} - \Delta n_{7m}}{l} \cdot z) \cdot \alpha = (1,6 + \frac{4,4 - 1,6}{2,4} \cdot 1,245) \cdot 10^{-5} = \\ &= 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ м;} \end{aligned}$$

**2) сечения D (при  $z = a + b + c = 1,5 + 0,9 + 0,7 = 3,1$  м):**

$$\begin{aligned} \Delta V_C &= (\Delta n_{7m} + \frac{\Delta n_{8m} - \Delta n_{7m}}{l} \cdot z) \cdot \alpha = (1,6 + \frac{4,4 - 1,6}{2,4} \cdot 3,1) \cdot 10^{-5} = \\ &= 5,22 \cdot 10^{-5} \text{ м.} \end{aligned}$$

**Опытные перемещения (совместно с осадкой опор):**

**1) сечения S**  $V_1 = \Delta n_{1m} \cdot \alpha = 81,6 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 81,6 \cdot 10^{-5}$  м;

**2) сечения D**  $V_2 = \Delta n_{2m} \cdot \alpha = 68,6 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 68,6 \cdot 10^{-5}$  м.

**Опытные прогибы (без осадки опор)**

**1) сечения S:**

$$V_1^* = V_1 - \Delta V_1 = 81,6 \cdot 10^{-5} - 3,05 \cdot 10^{-5} = 78,6 \cdot 10^{-5} \text{ м;}$$

**2) сечения D:**

$$V_2^* = V_2 + \Delta V_2 = 68,6 \cdot 10^{-5} + 5,22 \cdot 10^{-5} = 73,82 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

### Больший абсолютный прогиб в точке S

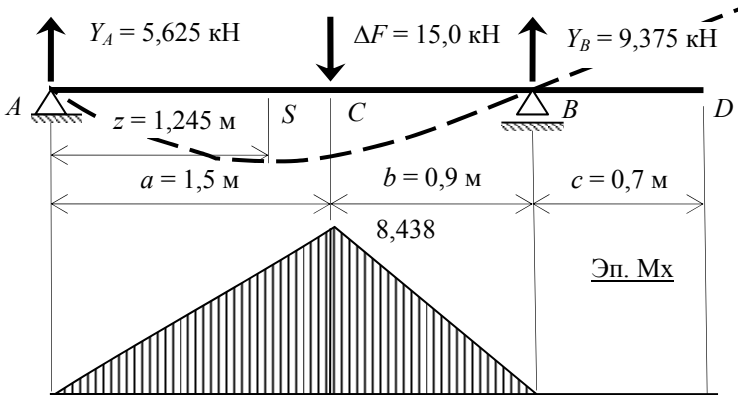
$$V_{\max}^* = 78,6 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

### Большой относительный прогиб (в точке S)

$$\frac{V_1^*}{l} = \frac{78,6 \cdot 10^{-5}}{2,4} = 32,75 \cdot 10^{-5} = \frac{1}{3053} < \left[ \frac{f}{l} \right] = \frac{1}{400}.$$

### Теоретический расчет

#### Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов



Начальные параметры универсального уравнения изогнутой оси балки определяем из условий  $V_A = 0$ , ( $z = 0$ );  $V_B = 0$  ( $z = 2,4$  м)

$$EIV_A = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot 0 = 0; \quad EIV_0 = 0; \quad V_0 = 0;$$

$$EIV_B = 0 + EI\theta_0 \cdot 2,4 + \frac{5,625 \cdot 10^3 \cdot (2,4 - 0)^3}{6} - \frac{15 \cdot 10^3 \cdot (2,4 - 1,5)^3}{6} = 0;$$

$$EI\theta_0 = -4,64 \cdot 10^3; \quad \theta_0 = -0,88 \cdot 10^{-3}.$$

**Прогибы и углы поворота  
Сечения S ( $z = z_1 = 1,245$  м)**

$$EIv_S = 0 - 4,64 \cdot 10^3 \cdot 1,245 + \frac{5,625 \cdot 10^3 (1,245 - 0)^3}{6} = -3,97 \cdot 10^3;$$

$$v_S = -\frac{3,97 \cdot 10^3}{206 \cdot 10^9 \cdot 2550 \cdot 10^{-8}} = -0,76 \text{ мм};$$

$$EI\theta_S = -4,64 \cdot 10^3 + \frac{5,625 \cdot 10^3 \cdot (1,245 - 0)^2}{2} = -0,28 \cdot 10^3;$$

$$\theta_S = -\frac{0,28 \cdot 10^3}{206 \cdot 10^9 \cdot 2550 \cdot 10^{-8}} = -0,053 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = -0,003^\circ;$$

**Сечения D ( $z = a + b + c = 1,5 + 0,9 + 0,7 = 3,1$  м)**

$$EIv_D = 0 - 4,64 \cdot 10^3 + \frac{5,625 \cdot 10^3 (3,1 - 0)^3}{6} - \frac{15 \cdot 10^3 (3,1 - 1,5)^3}{6} +$$

$$+ \frac{9,375 \cdot 10^3 (3,1 - 2,4)^3}{6} = 3,839 \cdot 10^3;$$

$$v_D = \frac{3,839 \cdot 10^3}{206 \cdot 10^9 \cdot 2550 \cdot 10^{-8}} = 0,73 \text{ мм}.$$

**Сечение A ( $z = 0$ )**

$$\theta_A = \theta_0 = -0,88 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,05^\circ.$$

**Сравнение результатов**

Значения	$\theta_A^0$	$\theta_S^0$	$v_S$ , мм	$v_D$ , мм
Опытные	0,07	0	0,786	0,738
Теоретические	0,05	0,003	0,760	0,730
Расхождения, %	40	—	3,3	1,1



## Выводы

Универсальное уравнение упругой оси балки достоверно. Установлено, что прогибы балки прямо пропорциональны нагрузке.

Работу выполнил

Преподаватель

\_\_\_\_\_  
Дата \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ .....	4
ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ .....	5
ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	6
1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ И ПРИБОРАХ .....	6
1.1. Инструменты для измерения размеров образцов .....	6
1.2. Приборы механического принципа действия для измерения деформаций .....	7
1.3. Приборы для измерения деформаций электрического принципа действия .....	9
2. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ .....	17
3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ .....	17
3.1. Механические характеристики прочности .....	17
3.2. Механические характеристики пластичности .....	18
3.3. Основные механические характеристики некоторых материалов .....	20
ЧАСТЬ II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ .....	21
Лабораторная работа № 1 ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ .....	21
Лабораторная работа № 2 ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ .....	29
Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ .....	36
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ВТОРОГО РОДА (МОДУЛЯ СДВИГА) .....	42
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ .....	49
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ .....	57

Лабораторная работа № 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ	
ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ .....	67
ЛИТЕРАТУРА .....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ. Образцы оформления отчетов	
по лабораторным работам.....	76
Отчет по лабораторной работе № 1	
ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ .....	76
Отчет по лабораторной работе № 2	
ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ.....	81
Отчет по лабораторной работе № 3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ	
И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ .....	85
Отчет по лабораторной работе № 4	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА.....	90
Отчет по лабораторной работе № 5	
ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	
ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ .....	94
Отчет по лабораторной работе № 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ	
ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ.....	99
Отчет по лабораторной работе № 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ	
ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ .....	103

Учебное издание

## **МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ**

Пособие

для студентов специальности 1-36 11 01

«Иновационная техника для строительного комплекса  
(по направлениям)»

В 2 частях

Часть 1

Составители:

**ВЕРБИЦКАЯ** Ольга Леонидовна

**ШЕВЧУК** Леонид Иванович

**ЕВСЕЕВА** Елена Анатольевна и др.

Редактор *П. П. Горбач*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 10.01.2023. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 6,45. Уч.-изд. л. 4,60. Тираж 100. Заказ 639.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.