



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Сопротивление материалов и теория упругости»

О. Л. Вербицкая
С. И. Зиневич
Л. И. Шевчук

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

*Пособие по выполнению лабораторных работ
для студентов строительных специальностей*

Часть 1

Минск
БНТУ
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Сопротивление материалов и теория упругости»

О. Л. Вербицкая
С. И. Зиневич
Л. И. Шевчук

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Пособие по выполнению лабораторных работ
для студентов строительных специальностей

В 2 частях

Часть 1

Минск
БНТУ
2014

УДК 620.1:539.3/.6(076.5)(075.8)

ББК 30.121я7

В31

Рецензенты:

С. Е. Кравченко, Л. Р. Мытько

Вербицкая, О. Л.

- В31 Сопrotивление материалов : пособие по выполнению лабораторных работ для студентов строительных специальностей : в 2 ч. / О. Л. Вербицкая, С. И. Зиневич, Л. И. Шевчук. – Минск : БНТУ, 2014. – . – Ч. 1. – 139 с.
ISBN 978-985-550-043-9 (Ч. 1).

Пособие содержит теоретическую часть и лабораторные работы, предусмотренные типовыми учебными программами по сопротивлению материалов для строительных специальностей. 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, контрольные вопросы.

Методика проведения лабораторных работ включает внеаудиторное изучение теории, подготовку журнала, его заполнение, проведение исследований и обработку опытных данных.

УДК 620.1:539.3/.6(076.5)(075.8)

ББК 30.121я7

ISBN 978-985-550-043-9 (Ч. 1)

ISBN 978-985-550-044-6

© Вербицкая О. Л., Зиневич С. И.,
Шевчук Л. И., 2014

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы прочности, упругости, пластичности и жесткости материалов имеют большое значение (занимают важное место) 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 и механизмов, элементов строительных конструкций могут привести к их непригодности или 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 сопротивлению 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 сопротивления материалов и оценке погрешностей результатов, появляющихся за счет принятых гипотез и допущений (плоские сечения, отсутствие давлений волокон), и применению упрощенного закона деформирования материала – закона Гука.

Особенно важным является то, что 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:

- описание свойств материалов, используемых в строительстве, и краткая информация об их производстве или происхождении;
- описание приборов и испытательных машин, используемых в лабораторных работах;
- описание образцов при испытании материалов на различные виды сопротивлений;
- подробное описание хода выполнения лабораторных работ;
- примеры оформления отчетов о каждой лабораторной работе;
- контрольные вопросы для защиты лабораторных работ;

– ссылки на литературу для более глубокого изучения материала.

Навыки, полученные при выполнении лабораторных работ, необходимы специалистам различных областей строительства, так как результаты испытания материалов используются при проектировании сооружений, их изготовлении и эксплуатации.

Пособие подготовлено с использованием материалов, разработанных на кафедре сопротивления материалов и теории упругости Белорусского национального технического университета, и учебной литературы, приведенной в списке.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ по сопротивлению материалов студент подвергается воздействию опасных для жизни и вредных для здоровья производственных факторов: электрического напряжения, подвижных частей испытательных машин и установок, острых кромок, заусенцев и шероховатостей 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 гирями либо имеющиедвигающиеся рабочие детали.

Для предотвращения травм студент обязан соблюдать следующие основные правила:

1. Выполнять требования по соблюдению правил техники безопасности.
2. Приступать к выполнению лабораторной работы только после разрешения преподавателя или персонала лаборатории.
3. Студенту запрещается 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 неисправностей немедленно сообщить об этом преподавателю либо работнику лаборатории.
6. Запрещается производить какие-либо действия с установками, не относящимися к выполняемой лабораторной работе.

7. Студенту запрещается самостоятельно включать рубильники, нажимать на кнопки пульта испытательных машин, вставлять вилки приборов в розетки электросети, поворачивать рычаги испытательных установок, заводить руки в опасные зоны испытания.

8. К лабораторным работам допускаются студенты, ознакомленные с разработанной на кафедре инструкцией по охране труда, и 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 сопротивления материалов, используя учебники и пособия, включая и данное.

2. Для выполнения лабораторных работ необходимо иметь бланк протокола лабораторной работы, который следует оформить или ксерокопировать по образцу, приведенному в настоящем пособии. Недостаточная подготовка и отсутствие бланка протокола лабораторной работы дает право преподавателю не допустить студента к занятию.

3. Опоздание или пропуск лабораторных занятий не допускаются. Пропущенная хотя бы одна лабораторная работа расценивается как невыполнение учебного плана, и студент в этом случае не допускается кафедрой к экзамену по сопротивлению 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 проводятся 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 пособие.

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

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 и не растягиваются, 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. 1.1).

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.

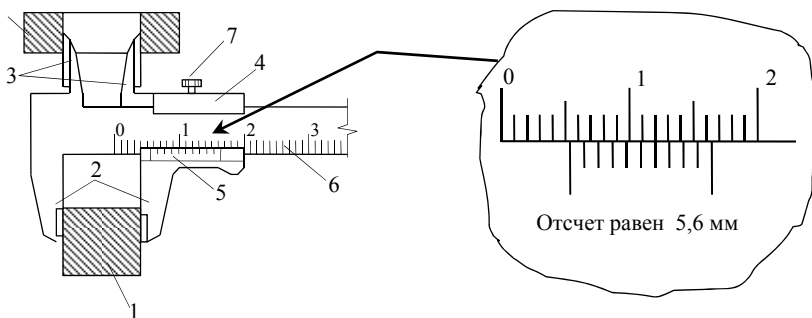


Рис. 1.1. Схема измерения внешнего и внутреннего размеров с помощью штангенциркуля: 1 – измеряемые детали; 2, 3 – губки штангенциркуля; 4 – рамка; 5 – нониус с 10 делениями; 6 – штанга с делениями; 7 – зажимной винт

Для измерения внутреннего размера детали или образца (например, диаметра отверстия) губки 3 поместить 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 деформации.

Линейные деформации тела характеризуются изменением взаимного расположения его точек, то есть перемещением точек тела относительно друг друга. Эти перемещения измеряют тензотравами, 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 тензотравом, 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 тензометры по принципу своего действия разделяются на три вида:

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

1.2.2. Стрелочный индикатор

Стрелочный индикатор является измерительным прибором механического принципа действия. Внешний вид и схема прибора приведены на рис. 1.2. Измерительный стержень индикатора связан со стрелкой зубчатой передачи, 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 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.

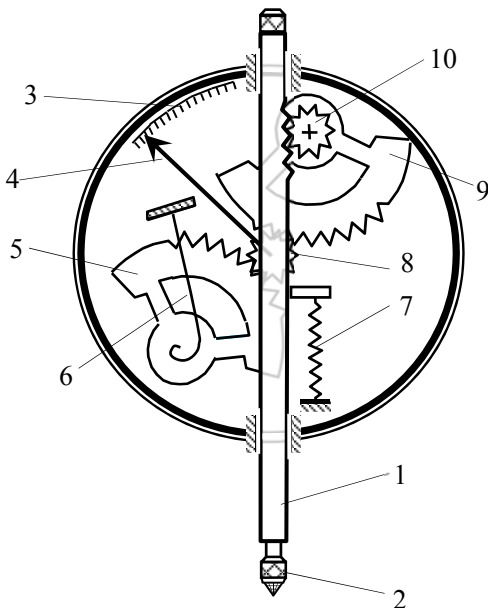


Рис. 1.2. Схема стрелочного индикатора с указанием его деталей:
 1 – измерительный стержень; 2 – съемный наконечник; 3 – шкала прибора;
 4 – стрелка на шкале прибора; 5 – поджимная шестеренка; 6 – поджимная пружина
 шестеренок; 7 – поджимная пружина измерительного стержня; 8 – шестеренка
 на выходе; 9 – подающая шестеренка; 10 – принимающая шестеренка

Деформации (удлинение либо укорочение базы измерения) вызывают перемещение измерительного стержня 1. С помощью зубчато-реечного механизма линейное перемещение измерительного стержня приводит к повороту малую шестеренку 10. Так как принимающая шестеренка 10 и большая шестеренки 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 стрелки 4 на большие углы. 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 всегда должна быть указана на шкале прибора.

1.3. Приборы электрического принципа действия для измерения деформаций

1.3.1. Общие понятия

В настоящее время для измерения деформаций широкое 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 машины 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 передается доступным для восприятия человеком носителем (индикация чисел, график, звуковой или световой сигнал и др.). В зависимости от того какой электрический параметр датчика изменяется, различают датчики сопротивления, емкостные и индуктивные.

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 динамиче-

ских нагрузках, на быстро перемещающихся деталях, в труднодоступных местах, а также на конструкциях, испытывающих предельные нагрузки, и даже при разрушении сооружений. Небольшие размеры проволочных датчиков позволяют размещать их на небольшой площади конструкции, что дает возможность более детального изучения напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции. Кроме того, проволочные датчики дешевые, поэтому экономические затраты от их потери при испытаниях с доведением конструкций, машин или механизмов до разрушения малы.

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

Главным недостатком электротензометрического метода является малая точность измерения, что во многом зависит от материала, из которого изготовлена испытываемая конструкция, качества поверхности, качества наклейки датчика и др., поэтому этот метод может применяться только в тех случаях, когда высокая точность измерений не требуется.

Проволочный датчик сопротивления представляет собой тонкую проволоку, изогнутую в виде плоских петель, наклеенную на полосу специальной бумаги или пленки. Специальным клеем (раствор целлулоида в ацетоне или БФ-4) датчик наклеивается на поверхность испытываемого объекта, что обеспечивает его совместную деформацию с деформацией поверхности детали или элемента конструкции. Проволока изготовлена из константанового или 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, что 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 в электрической цепи их сопротивления 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 ΔR прямо пропорционален относительной линейной деформации ε :

$$\Delta R = \varepsilon R \gamma, \quad (1.1)$$

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

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

Из формулы (1.1) выражается линейная деформация ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \gamma}.$$

Величины γ и R для датчика постоянные, а величина ΔR измеряется прибором. Изменение ΔR 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 и с отсчетом по шкале балансировочного устройства (метод установки нуля).

1.3.2. Мостовая схема с отсчетом по гальванометру

В процессе деформации конструкции, детали машины или объекта изменяется сопротивление рабочего датчика R_p (рис. 1.3). Для определения этого изменения применяют равноплечий электрический мост. Рабочий датчик с сопротивлением R_p , наклеенный на поверхность конструкции, включается в одно плечо моста. Три других плеча, образуемые сопротивлениями R_1 , R_2 и компенсирующим датчиком R_k , должны иметь сопротивление, равное ему. Все четыре сопротивления образуют уравновешенный мост, если разность потенциалов между узлами 1 и 3 будет равна нулю.

Известно, что на электрическое сопротивление проводника оказывает влияние температура. Чем она выше, тем больше «раскачиваются» атомы проводника (металлов) около своих штатных положений в кристаллической решетке и тем самым 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. Кристаллическая решетка проводника оказывает гораздо меньшее сопротивление такому малому перемещению электронов.

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 .

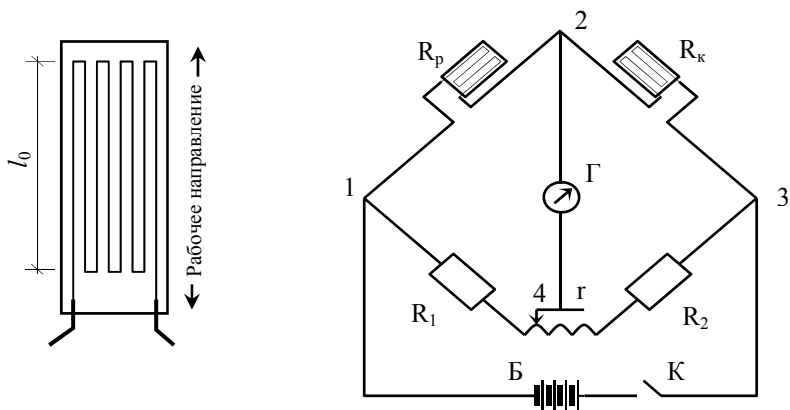


Рис. 1.3. Проволочный датчик сопротивления и мостовая схема с отсчетом по гальванометру: К – ключ; Б – питание; Γ – гальванометр; R_p – рабочий датчик; R_k – компенсирующий датчик; R_1 и R_2 – сопротивления; r – переменное сопротивление

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

Перед нагружением конструкции или детали следует произвести балансировку моста за счет изменения сопротивлений R_1 и R_2 , а также переменным сопротивлением r . Иногда сопротивлениями R_1 и R_2 служат датчики, наклеенные на поверхность с двух сторон консольной балки (рис. 1.4) (такая балка называется балансировочной). В этом случае регулировку сопротивлений датчиков производят деформацией балки. Если балка искривляется выпуклостью вверх, то ее верхние волокна удлиняются, а нижние укорачиваются, поэтому датчик R_1 , наклеенный на 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. Напротив, если балка искривляется выпуклостью вниз, то сопротивление верхнего датчика R_1 уменьшается, а нижнего R_2 – увеличивается.

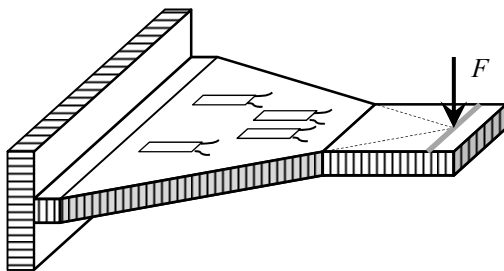


Рис. 1.4. Схема тарировочной балки

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

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{2} \frac{\Delta l}{l} = \frac{K}{2} \varepsilon,$$

где ΔR – приращение сопротивления деформированной проволоки;
 R – электрическое сопротивление недеформированной проволоки;
 K – чувствительность проволоки к деформации (коэффициент тензочувствительности);
 ε – относительная линейная деформация проволоки.
 Изменение сопротивления датчика

$$\Delta R = \alpha_0 \Delta n,$$

где ΔR – изменение электрического сопротивления датчика;

α_0 – цена деления гальванометра;

Δn – изменение показания гальванометра.

Тогда зависимость деформации датчика от изменения показания гальванометра примет вид

$$\frac{\alpha_0 \Delta n}{R} = \frac{K}{2} \varepsilon$$

или

$$\varepsilon = \frac{2\alpha_0}{RK} \Delta n.$$

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 (см. рис. 1.4), которая за счет своей формы имеет ту особенность, что при нагружении в любой точке ее поверхности появляются одинаковые деформации.

На верхнюю и 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 Δn :

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

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. 1.5) несущественно отличается от схемы измерения деформаций с отсчетом по гальванометру (см. рис. 1.3).

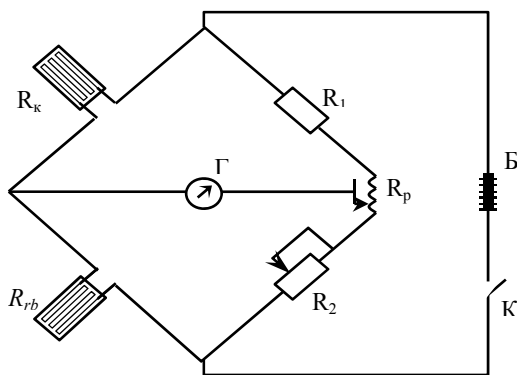


Рис. 1.5. Мостовая схема с отсчетом по нулевому методу:
 R_{rb} – рабочий датчик; R_k – компенсирующий датчик; R_p – реохорд;
 R_1 – сопротивление; R_2 – переменное сопротивление; Γ – гальванометр;
 K – переключатель; B – источник питания

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, тем самым, – 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.

Контрольные вопросы

1. Какие инструменты используются для измерения линейных размеров твердых тел?
2. Измерения каких размеров деталей могут быть выполнены штангенциркулем?
3. Какие действия и в какой последовательности следует выполнять при измерении штангенциркулем наружных и внутренних размеров детали?
4. На каких два вида делятся деформации тел?
5. Какие деформации тела называются линейными?
6. Какие деформации тела называются угловыми?
7. Что называется базой измерения прибора и из каких соображений она выбирается?
8. На каких три вида делятся тензометры по принципу своего действия?
9. К какому виду по своему принципу действия относится стрелочный индикатор?
10. Какую цену деления и базу измерения могут иметь стрелочные индикаторы?
11. Опишите принцип работы механизма стрелочного индикатора.
12. Что по своему смыслу означает цена деления прибора?
13. Изменение каких параметров проводника электрического тока используется в электротензометрических методах?
14. Какой элемент измерительного прибора называется датчиком и какую функцию он выполняет при измерении деформаций?
15. Для чего предназначено преобразующее устройство в измерительном приборе?
16. Какие преимущества и недостатки имеет измерение деформаций электротензометрическим методом по сравнению с измерениями механическими тензомерами?
17. Что следует понимать под тензометрированием?

18. Как устроен проволочный датчик сопротивления и как он крепится к детали (конструкции)?

19. На каком принципе основана работа проволочного датчика?

20. Какое направление датчика является рабочим и почему?

21. Какие электрические мостовые схемы используются для измерения деформаций?

22. Как устроен электрический мост при измерении с отсчетом по гальванометру?

23. Как влияет изменение температуры на электрическое сопротивление проводника?

24. Для чего предназначен и где должен располагаться компенсирующий датчик при измерении деформаций?

25. Как компенсируется влияние температуры на электрическое сопротивление рабочего датчика?

26. Почему напряжение источника питания ограничено и не должно превышать 8 В?

27. Как выполняется балансировка электрического моста с помощью балансирующей балки?

28. На каком принципе основано измерение деформации методом отсчета по гальванометру?

29. Как определяется цена деления прибора?

30. Какие основные параметры характеризуют проволочный датчик?

31. Как определяется цена деления прибора с помощью тарировочной балки?

32. Какую особенность имеет тарировочная балка?

33. Какую форму и почему именно такую имеет тарировочная балка?

34. Чем отличается измерение деформаций методом установки нуля от метода отсчета по гальванометру?

35. В чем преимущество измерения деформаций методом установки нуля?

36. Как устроена мостовая схема для измерения деформаций методом установки нуля?

37. Каков принцип работы мостовой схемы для измерения деформаций методом установки нуля?

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

2.1. Чугун

Чугуном называется сплав железа с углеродом, который содержит более 2 % углерода. Чугун может быть передельным и литейным. Передельный чугун используется для производства стали, а литейный – для литья фасонных изделий. Исходными материалами для доменного производства чугуна являются руда, флюсы, топливо и воздух.

Железная руда – это горная порода, содержащая железо в таких количествах, при которых ее технически и экономически целесообразно перерабатывать. Руда состоит из смеси железосодержащих минералов с пустой породой. Для производства чугуна используются руды – магнитный, красный, бурый а также шпатовый железняк.

Обогащение руды. Перед производством чугуна руду обогащают, удаляя пустую породу и повышая содержание железа. Для этого используются два способа – промывка и магнитная сепарация.

Топливо. Основным видом топлива в доменных печах является *кокс*. Кокс получается сухой перегонкой некоторых сортов каменного угля при 1000–1200 °С без доступа воздуха. Такие сорта угля называются *коксующими*. В специальных коксовых печах происходит спекание угля в течение 15–20 ч. При этом удаляются летучие вещества. Предварительно уголь измельчается в щековых дробилках до размера зерен 2–3 мм. Отсутствие летучих веществ и большая пористость кокса обеспечивают высокую температуру его горения.

Доменная печь представляет собой вертикальное сооружение шахтного типа. Современные доменные печи имеют общую высоту до 80 м с полезным объемом до 5000 м³.

Плавка чугуна. Агломерат, руда, флюс и кокс, поступающие в печь в определенном соотношении, называют шихтой. Через загрузочное устройство шихта попадает в доменную печь. Доменные печи, как и все шахтные печи, работают по принципу противотока. Сверху сходят шихтовые материалы, а снизу им навстречу движутся газы, образующиеся в процессе горения топлива. В шахте происходят процессы восстановления окислов железа и его науглероживание. В нижней части домны накапливается жидкий чугун, а выше – жидкая пустая порода. Их периодически сливают в ковши. Чугун используют для дальнейшей переработки.

2.2. Металлургия стали

Сталь – это сплав железа с углеродом, который содержит менее 2 % углерода (обычно не более 1,3 %). Постоянными примесями в стали являются марганец, кремний, фосфор и сера. Кроме углеродистых в машиностроении и строительстве широко применяют легированные стали, в состав которых для улучшения тех или иных свойств дополнительно вводят хром, никель, молибден и другие элементы.

Исходными материалами для получения стали служат передельный чугуны, стальной лом и ферросплавы. Основная задача передела чугуна в сталь состоит в удалении избытка углерода и примесей с помощью окислительных процессов, протекающих в сталеплавильных агрегатах. Основными способами производства стали являются кислородно-конверторный, мартеновский и электродуговой.

2.2.1. Кислородно-конверторное производство стали

В основе конверторных процессов лежит обработка жидкого чугуна газообразными окислителями. Кислород под давлением 0,8–1,0 МПа (8–10 атм.) подается сверху через водоохлаждаемую форму. После окончания продувки и получения заданного содержания углерода берут пробу и сливают металл в ковш. В ковше сталь раскисляется за счет окисления марганца, кремния и алюминия. В зависимости от степени раскисленности различают кипящие, полуспокойные и спокойные стали.

Кипящие стали раскисляются только ферромарганцем. В таких сталях частично остаются растворенные окислы железа и при кристаллизации продолжает идти процесс «кипения» из-за реакции восстановления железа. Газовые пузыри остаются в теле затвердевшего слитка и завариваются при последующей прокатке. Кипящая сталь дает наиболее высокий выход годного металла, наименьшие отходы, благодаря чему она обладает самой низкой стоимостью, но и самым низким качеством.

Спокойная сталь комплексно раскисляется ферромарганцем, ферросилицием и алюминием. В металле нет растворенного окисла железа и процесс кипения прекращается, сталь «успокаивается». Значительная часть стального слитка идет в отход, поэтому такая сталь, обладая высоким качеством, является наиболее дорогой.

Полуспокойная сталь раскисляется ферромарганцем и уменьшенным количеством ферросилиция. По качеству и стоимости она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталью.

2.2.2. Мартеновское производство стали

Мартеновская печь является пламенной регенеративной печью. В ее рабочем пространстве сжигается газообразное или жидкое топливо. Через завалочные окна в печь по ходу плавки загружают шихту и дополнительные материалы. Через отверстие в задней стене производят выпуск готового металла и шлака.

Если выплавляется легированная сталь, то добавляют легирующие элементы – никель, медь, молибден, хром, марганец, кремний, титан, ванадий, алюминий, бор.

2.2.3. Производство стали в электропечах

Электроплавка – наиболее совершенный способ получения стали, имеющий ряд преимуществ по сравнению с производством стали в конверторах и мартеновских печах.

Шихта, загружаемая в электропечь, состоит из стального лома, легированных отходов, чугуна, флюсов, железной руды, легирующих добавок и раскислителей.

Нагрев в индукционных печах осуществляется за счет джоулева тепла, выделяемого в твердом или жидком металле вихревыми токами, индуцируемыми переменным электромагнитным полем.

Через индуктор, представляющий собой катушку из медной трубки, охлаждаемой внутри водой, пропускают ток, возбуждающий вокруг переменное магнитное поле. В металле, находящемся в тигле, индуцируются мощные вихревые токи, обеспечивающие его нагрев и плавление.

2.3. Бетон

Бетон – это искусственный каменный материал, получаемый из рационально подобранной смеси вяжущего вещества (с водой, реже без неё), заполнителей (каменной щебенки) и специальных добавок. Он является одним из основных строительных материалов.

Физико-технические свойства бетона

Основные свойства бетона – плотность, содержание связанной воды, прочность при сжатии и растяжении, морозостойкость, теплопроводность и техническая вязкость (жесткость смеси).

Прочность бетона характеризуется его классом (временным сопротивлением на сжатие, осевым растяжением или растяжением при изгибе). Класс бетона по прочности на сжатие тяжёлых цементных, особо тяжёлых, лёгких и крупнопористых бетонов определяется испытанием на сжатие бетонных кубов со стороной, равной 200 мм, изготовленных из рабочего состава и испытанных после определённого срока выдержки.

Для образцов монолитного бетона промышленных и гражданских зданий и сооружений срок выдержки при нормальном твердении (при температуре 20 °С и относительной влажности не ниже 90 %) равен 28 суткам. Срок выдержки и условия твердения образцов бетона сборных изделий указываются в соответствующих ГОСТах. Прочность бетона на осевое растяжение ниже прочности бетона на сжатие примерно в 10 раз. Требования по прочности на растяжение при изгибе могут предъявляться, например, к бетону дорожных и аэродромных покрытий.

2.4. Цемент

Цемент – это искусственный неорганический порошкообразный вяжущий материал, обладающий способностью при взаимодействии с водой, водными растворами солей или другими жидкостями образовывать пластичную массу, которая со временем затвердевает и превращается в прочное камневидное тело.

Цементы являются наиболее распространенными строительными материалами, предназначенными для изготовления бетонов и строительных растворов, скрепления отдельных элементов (деталей) сооружений, гидроизоляции и др.

2.4.1. Производство цемента

Современный процесс производства цемента включает следующие этапы:

- добычу цементного природного сырья (мергели, известняки, мел, реже мраморы, травертин и др.) или использование в качестве такового некоторых промышленных отходов (металлургических шлаков, зол ТЭС, вскрышных пород и т. п.);
- дробление и тонкое его измельчение;
- приготовление однородной сырьевой смеси заданного состава;
- её обжиг до спекания при температуре 1450–1550 °С;
- измельчение полученного клинкера в тонкий порошок вместе с небольшим количеством гипса и активных минеральных добавок.

2.4.2. Прочность цемента

Прочность цемента определяется пределом прочности при изгибе образцов-призм размером 40 × 40 × 160 мм и при сжатии их половинок, изготовленных из цементного раствора состава 1 : 3 (по массе) при сроке твердения образцов 28 суток с момента изготовления.

2.5. Алюминий

Алюминий Al является химическим элементом серебристо-белого цвета и относится к лёгким металлам.

2.5.1. Физические, химические и механические свойства

Алюминий сочетает весьма ценный комплекс свойств: малую плотность, высокую теплопроводность и электрическую проводимость, пластичность, хорошую коррозионную стойкость и достаточную прочность. Он легко поддаётся ковке, штамповке, прокатке, волочению, хорошо сваривается газовой, контактной и другими видами сварки.

Алюминий обладает относительно невысокой прочностью (предел прочности 50–60 МН/м²), твёрдостью (170 МН/м² по Бринеллю) и высокой пластичностью (до 50 %). При холодной прокатке предел прочности алюминия возрастает до 115 МН/м², твёрдость – до 270 МН/м², относительное удлинение снижается до 5 % (при $\sigma = 1$ МН/м²). Алюминий стоек к действию атмосферной коррозии, морской и пресной воды, практически не взаимодействует с концентрированной или сильно разбавленной азотной кислотой, с органическими кислотами, пищевыми продуктами.

2.5.2. *Алюминиевые руды*

В природе имеется большое количество минералов и горных пород, содержащих алюминий, однако лишь немногие из них могут быть использованы для получения металлического алюминия. Наиболее широкое распространение в качестве алюминиевого сырья получили бокситы. Для получения алюминия применяются также нефелин-сиенитовые, нефелин-апатитовые и другие породы.

2.5.3. *Получение алюминия*

В промышленности алюминий получают электролизом глинозёма, растворённого в расплавленном криолите при температуре около 950 °С. (*Криолит* — минерал из группы природных фторидов, имеющий химический состав Na_3AlF_6). Электролитная ванна представляет собой железный кожух, футерованный внутри тепло- и электроизолирующим материалом — огнеупорным кирпичом — и выложенный угольными плитами и блоками. Рабочий объём заполняется расплавленным электролитом, состоящим из 6–8 % глинозёма и 92–94 % криолита. Катодом служит подина ванны, анодом — погружённые в электролит угольные обожжённые блоки или же набивные самообжигающиеся электроды. При прохождении тока на катоде выделяется расплавленный алюминий, который накапливается на подине, а на аноде — кислород, образующий с угольным анодом окислы углерода. Из ванн алюминий извлекают обычно с помощью вакуум-ковша. Расплавленный алюминий чистотой 99,7 % разливают в формы.

2.5.4. *Алюминиевые сплавы*

В строительстве используется не сам алюминий, а его сплавы. Поворотным моментом в развитии алюминиевых сплавов явились результаты исследований А. Вильма (Германия, 1903–1920 гг.), который обнаружил процесс старения алюминиевых сплавов, приводящего к резкому улучшению их свойств (главным образом прочностных). Этот улучшенный алюминиевый сплав был назван дуралюмином.

К самым прочным относятся сплавы алюминивно-марганцево-кремневый, алюминивно-цинкомагниевый; к наиболее жаропрочным – алюминивно-медно-марганцевый; к лёгким и высокомодульным алюминивно-берилливо-магниевый.

2.6. Основные механические характеристики некоторых материалов

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Остаточное удлинение, %	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
С т а л ь					
Ст. 2	320–400	190–220	28	196–206	0,3
Ст. 3	380–470	210–240	21–23	196–206	0,3
Ч у г у н с е р ы й					
СЧ21–40	210	158	–	85	0,23–0,27
СЧ35–56	350	298	–	145	0,23–0,27
Ч у г у н к о в к и й					
КЧ30–8	300	190	6	155	0,23
КЧ37–12	370	230	12	198	0,36
А л ю м и н и е в ы е с п л а в ы					
АМцМ	130	50	23	71	0,30
АМг6М	300	150	18	71	0,31
Д р у г и е м а т е р и а л ы					
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

Контрольные вопросы

1. Какой сплав называется чугуном?
2. Для чего предназначены пердедельный и литейный чугун?
3. Какие руды используются для производства чугуна?
4. Как происходит обогащение железной руды?
5. Что служит топливом для выплавки чугуна?
6. Как происходит выплавка чугуна в домне?
7. Какой сплав называется сталью?

8. Чем отличаются легированные стали от углеродистых?
9. Какие способы применяют для выплавки стали из чугуна?
10. Как выплавляется сталь конверторно-кислородным методом?
11. Какие недостатки и преимущества имеют кипящая, спокойная и полуспокойная стали?
12. Как выплавляется сталь мартеновским методом?
13. Как производится сталь в электропечах?
14. Какой материал называют бетоном?
15. Какими физико-техническими свойствами характеризуется бетон?
16. В какие сроки бетон приобретает проектную прочность?
17. Какое примерное отношение прочности бетона на сжатие и на растяжение?
18. Какой материал называется цементом?
19. Для каких целей цемент используется в строительстве?
20. Какие породы и материалы используются для производства цемента?
21. Как определяется прочность цемента?
22. Особенность физико-механических свойств алюминия.
23. Какими механическими характеристиками обладает алюминий?
24. Как получают алюминий?
25. Чем отличаются алюминиевые сплавы по своим механическим свойствам?

3. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Для изучения свойств материалов и определения их механических характеристик выполняются испытания 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 трех испытаний, при переменных нагрузках – не менее десяти испытаний.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

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

4.1. Механические характеристики прочности

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.

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

$$\sigma_{pr} = \frac{N_{pr}}{A_0}, \text{ МПа,}$$

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

A_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания.

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

$$\sigma_y = \frac{N_y}{A_0}, \text{ МПа,}$$

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

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

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0}, \text{ МПа,}$$

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

4.2. Механические характеристики пластичности

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

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100, \%$$

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

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

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

$$\chi = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100, \%$$

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

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

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

$$a = \eta \frac{N_u \Delta l_0}{V_0}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3},$$

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

V_0 – объем рабочей части образца:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot l_0.$$

Контрольные вопросы к разделам 3 и 4

1. На какие виды нагрузок выполняются испытания материалов?
2. На какие виды деформаций (сопротивлений) выполняются испытания материалов?
3. Какое количество образцов требуется испытать на статические, динамические и переменные нагрузки?
4. На какие две группы делятся механические характеристики материалов?

5. Как формулируется закон Гука?
6. Для каких материалов закон Гука строго выполняется?
7. Почему в расчетах закон Гука учитывается и для других материалов?
8. Какая механическая характеристика называется пределом пропорциональности?
9. Как обозначается и как вычисляется предел пропорциональности?
10. Какая механическая характеристика называется пределом текучести?
11. Как обозначается и как вычисляется предел текучести?
12. Какая механическая характеристика называется пределом прочности?
13. Как обозначается и как вычисляется предел прочности?
14. Какая механическая характеристика называется относительным остаточным удлинением?
15. Как обозначается и как вычисляется относительное остаточное удлинение?
16. Какая механическая характеристика называется относительным остаточным сужением?
17. Как обозначается и как вычисляется относительное остаточное сужение?
18. Какая механическая характеристика называется удельной работой?
19. Как обозначается и как вычисляется удельная работа разрушения материала?
20. Как определяется коэффициент полноты диаграммы и какое значение он принимает для малоуглеродистой стали?

ЧАСТЬ II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В строительстве сталь широко используется в качестве арматуры, элементов металлических ферм, балок стоек и колонн. Учиты-

вая значительные концентрации напряжений в узлах соединения конструкций, вызванных наличием отверстий, выточек и сварки, чаще всего используется малоуглеродистая (строительная) сталь. В такой стали благодаря ее способности к пластическим деформациям снижается концентрация напряжений, следовательно – образования усталостных трещин при переменных напряжениях. Кроме того, такая сталь хорошо сваривается, что упрощает изготовление арматурных каркасов и устройство узлов соединения элементов стальных конструкций. Высокопрочные стали хотя и обладают высокой прочностью, но являются хрупкими материалами, поэтому в строительстве применяются в основном для изготовления канатов и преднапряженной арматуры.

Стали делятся на группы, категории и марки. Нормирующими показателями для сталей являются механические характеристики прочности и пластичности, которые определяют по результатам испытания образцов на растяжение (разрыв).

Цель испытания

Целью испытания на растяжение образца из малоуглеродистой стали являются изучение зависимости между деформацией образца и растягивающей силой и 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 $+10 \dots +25$ °С, скорость подачи деформации 1 мм/мин, разрыв – в пределах рабочей части образца. Поверхность образца должна быть отшлифована и отполирована до зеркального блеска.

Испытательная машина

Для испытания используется разрывная машина Р-5 электромеханического привода с рычажно-маятниковым силоизмерителем.

Машина снабжена устройством для записи на бумагу диаграммы (машинной диаграммы) испытания – графика зависимости деформации образца от нагрузки. Наибольшая нагрузка, которую способна создать испытательная машина, равна 50 кН. Скорость деформации образца равна 1 мм/мин. Машина Р-5 предназначена для испытания на сжатие. Для испытания на растяжение используется специальное устройство, называемое реверсом.

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. Это может быть арматурный стержень, фасонка металлической фермы, элементы из прокатного профиля – уголка, швеллера или двутавра. Образец может быть изготовлен из отливки и др.

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. Если образец с утолщениями по концам изготовить невозможно, то при установке его в испытательную машину используют клинообразные вкладыши с зубцами с

шей силе. Следовательно, при таких нагрузках образец деформируется по закону Гука (рис. 1.2). Если на этой стадии испытания образец разгрузить, то самописец испытательной машины вычертит уже имеющуюся часть диаграммы, но в обратном порядке, то есть полная разгрузка образца приведет к полному восстановлению его первоначальных размеров и формы. Это указывает на то, что деформации образца на этой стадии испытания являются упругими.



Рис. 1.2. Образование линий Людерса-Чернова

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° , в результате чего на поверхности образуются складки. Это становится заметно 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, см. рис. 1.2.

Упрочнение стали и наклеп

Удлинившись на некоторую величину при постоянной нагрузке, то есть претерпев состояние текучести, сталь снова приобретает способность к увеличению сопротивления дальнейшему растяже-

нию, 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 разгрузить, то самописец испытательной машины не будет вычерчивать диаграмму в обратном порядке, а вычертит прямую линию разгрузки, ограниченную точками K и S , параллельную прямой участка между точками O и I . Если затем образец снова начать нагружать, то самописец вычертит прямую SK , а затем продолжит дорисовывать 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 снижает сопротивление образца растяжению (рис. 1.3). Так как испытательная 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.

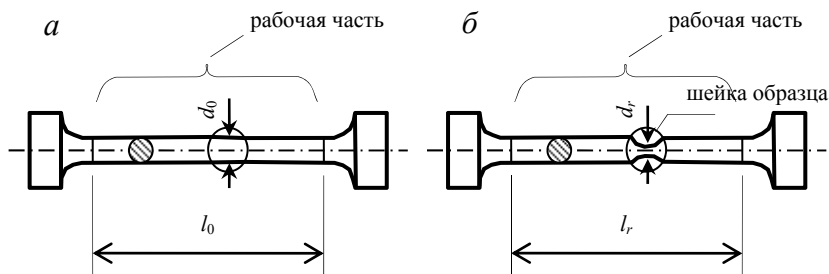


Рис. 1.3. Вид образца до испытания (а) и после испытания (б)

Полная, остаточная и упругая деформации образца

Деформация образца в момент разрыва называется полной Δl_{tot} и складывается из двух составляющих: упругой деформации Δl_e и остаточной (пластической) деформации Δl_r . Полная деформация непосредственно измерена быть не может, а устанавливается по машинной диаграмме с учетом ее масштаба. После разрыва образца упругая деформация Δl_e исчезает, а пластическая Δl_r остается.

Для определения остаточной (пластической) деформации необходимо измерить длину рабочей части образца после разрыва и вычесть его длину до испытания образца:

$$\Delta l_r = l_r - l_0.$$

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

$$\Delta l_e = \Delta l_{tot} - \Delta l_r.$$

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. 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 четырем точкам, отмеченным на машинной диаграмме, и делят их на первоначальную длину рабочей части образца. Используя полученные величины, в осях координат σ и ϵ , соблюдая масштаб, наносят четыре точки и соединяют их кривой, подобной машинной диаграмме растяжения.

В процессе испытания площадь поперечного сечения образца будет незначительно уменьшаться до точки 3 и поэтому 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. 1.4), поэтому при построении истинной диаграммы напряжений ордината четвертой точки (точки со штрихом) значительно больше ординаты четвертой точки диаграммы условных напряжений.

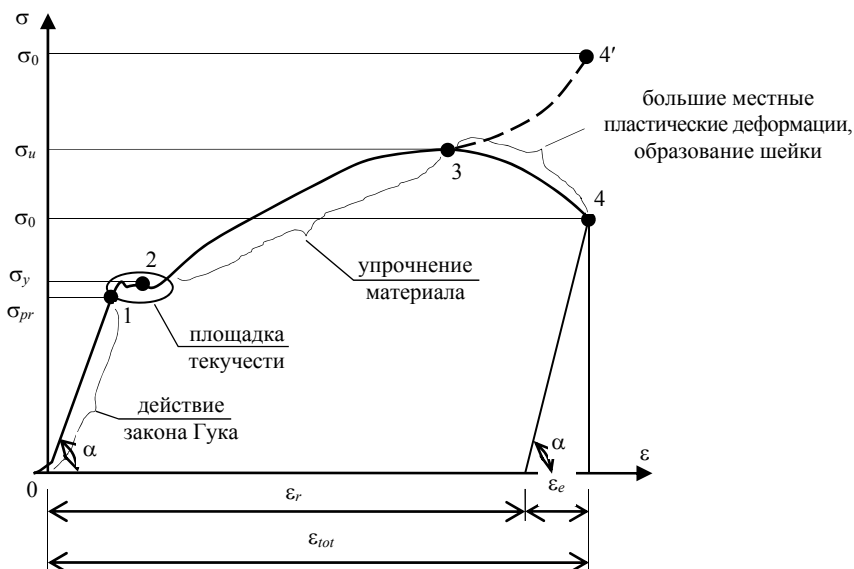


Рис. 1.4. Диаграмма истинных и условных напряжений образца из малоуглеродистой стали при испытании на растяжение

Нормирование стали

Марка стали

По результатам испытания на растяжение можно установить марку стали. Марка и технические требования к углеродистой стали общего назначения предусмотрены ГОСТ 380–88. Для сталей группы А категории 3 при определении марки стали нормирующими показателями являются: предел прочности σ_u , предел текучести σ_y и

относительное остаточное удлинение после разрушения образца ϵ_r . Механические характеристики горячекатаной прокатной и листовой стали по ГОСТ 380–88 при толщине до 20 мм при растяжении приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Механические характеристики углеродистой стали
по ГОСТ 380–88

Марка стали	Предел прочности $\sigma_{и}$, МПа	Предел текучести нормированный σ_{yn} , МПа	Относительное остаточное удлинение $\epsilon_{r,s}$, %
		не менее	
Ст. 0	Не менее 300	Не нормируется	23
Ст. 1 кп	300–390	–/–/–	35
Ст. 1 пс, сп	310–410	–/–/–	34
Ст. 2 кп	320–410	215	33
Ст. 2 пс, сп	330–430	225	32
Ст. 3 кп	360–460	235	27
Ст. 3 пс, сп	370–480	245	26
Ст. 4 кп	400–510	255	25
Ст. 4 пс, сп	410–530	265	24
Ст. 5 пс, сп	490–630	285	20
Ст. 6 пс, сп	Не менее 590	315	15

В табл. 1.1 последняя цифра в наименовании марки стали означает номер категории. Дополнение в наименовании марки стали указывает способ ее получения: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная.

Нормативное сопротивление

За нормативное сопротивление для данной марки стали принимается минимальное значение предела текучести, приведенное в ГОСТе, то есть $R_n = \sigma_{yn}$.

Расчетное сопротивление

Величина расчетного сопротивления стали равна нормативному сопротивлению, деленному на коэффициент надежности по материалу γ_m согласно ГОСТ 380–88:

$$R_y = R_n / \gamma_m . \quad (1.1)$$

Порядок проведения испытания и обработка результатов

Порядок проведения испытания

1. Ознакомиться с устройством испытательной машины и ее принципиальной схемой действия. Записать тип машины, цену деления шкалы силоизмерительного устройства, масштаб построения диаграммы по нагрузке и по деформации.

2. Измерить диаметр и длину рабочей части образца, отмеченной кернами, до испытания.

3. Закрепить образец в реверсоре и установить его в захваты пресса.

Реверсор – это устройство, обеспечивающее растяжение и разрыв установленного в нем образца на испытательных машинах, предназначенных для испытаний на сжатие.

4. Проверить работу устройства для записи диаграммы. Для этого повернуть барабан вхолостую и получить нулевую линию.

5. Включить испытательную машину (пресс) и наблюдать за процессом растяжения образца – получение прямолинейного участка диаграммы, площадки текучести, области упрочнения, уменьшение нагрузки, образование шейки на образце и его разрушение.

6. После разрушения образца выключить испытательную машину (пресс), вынуть из захватов реверсор и достать из него обе части разрушенного образца.

7. Записать значение наибольшей нагрузки, отмеченной инертной стрелкой на шкале силоизмерительного устройства.

8. Снять с барабана бумагу с диаграммой растяжения.

9. Приступить к обработке результатов и оформлению отчета о 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 l_r между ними.

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

$$d_r = \frac{d_{r1} + d_{r2}}{2}.$$

3. Вычислить площадь сечения образца в месте образования шейки:

$$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4}.$$

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 Δl так, чтобы снизу она была касательной к диаграмме. Затем продлить прямолинейную часть диаграммы вниз до ее пересечения с горизонтальной осью Δl . Выбрать эту точку пересечения как начало координат и через нее провести вверх вертикальную ось N .

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.

6. Учитывая масштаб построения диаграммы, определить координаты отмеченных четырех точек, которые по вертикальному направлению будут соответствовать силам N_{pr} , N_y , N_u и N_0 , а по горизонтальному направлению – деформациям Δl_{pr} , Δl_y , Δl_u и Δl_0 .

7. По полученным данным определить механические характеристики стали:

– предел пропорциональности

$$\sigma_{pr} = N_{pr} / A_0 ;$$

– предел текучести

$$\sigma_y = N_y / A_0 ;$$

– предел прочности

$$\sigma_u = N_u / A_0 ;$$

– условное напряжение разрыва образца

$$\sigma_0 = N_0 / A_0 ;$$

– истинное напряжение разрыва образца

$$\sigma'_0 = N_0 / A_r ;$$

– относительное остаточное удлинение образца

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100, \% ;$$

– относительное остаточное сужение образца

$$\chi = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100, \% .$$

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

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

9. Построить диаграмму напряжений. Для этого изобразить ось относительных линейных деформаций ϵ и ось напряжений σ . Далее, используя значения механических характеристик стали и соответствующие им относительные деформации, нанести на график четыре точки и соединить их линией, подобной линии, изображающей машинную диаграмму испытания на растяжение стального образца.

10. Используя полученные механические характеристики и нормативные данные, определить марку стали и расчетное сопротивление (формула (1.1)).

11. Проанализировать полученные результаты испытания и сделать вывод.

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

Контрольные вопросы

1. Почему малоуглеродистая сталь широко используется для изготовления строительных конструкций?

2. Для чего в строительстве используются высокопрочные стали?

3. Какие показатели для стали являются нормируемыми?

4. Какова цель лабораторной работы по испытанию малоуглеродистой стали на растяжение?

5. Какие требования должны быть выполнены при испытании на растяжение?

6. Какая машина использована для испытания образца на растяжение и каковы ее характеристики?

7. Какие измерительные приборы и инструменты используются при выполнении лабораторной работы?

8. Какие формы и размеры могут иметь стальные образцы для испытания на растяжение?

9. Какая часть образца называется рабочей?

10. Какой образец называется длинным (десятикратным), а какой – коротким (пятикратным)?

11. Каким образом обеспечивается надежный захват образца?

12. Какая диаграмма называется машинной диаграммой испытания?

13. Какие особенности имеет участок диаграммы, на котором действует закон Гука?

14. Как выглядит площадка текучести и чем объясняется появление линий Людерса–Чернова?

15. Какая часть диаграммы соответствует упрочнению стали?

16. Что называется наклепом и как выглядит диаграмма испытания образца при промежуточной разгрузке и последующем нагружении?

17. Какая часть диаграммы соответствует большим местным пластическим деформациям и образованию шейки?

18. Какая деформация называется полной и из каких видов деформаций она состоит?

19. Как определяется полная деформация образца?

20. Как определяется остаточная деформация образца?

21. Как определяется упругая деформация образца?

22. Как строится диаграмма условных и истинных напряжений?

23. Какие показатели являются нормируемыми при определении марки стали?

24. Какая величина принимается за нормативное сопротивление стали?

25. Как определяется расчетное сопротивление стали?

26. Каков порядок проведения испытания?

27. Для чего предназначен реверсор?

28. Почему на начальном участке машинная диаграмма имеет вид кривой линии?

29. Как наносятся на диаграмму напряжений четыре ее особенные точки?

30. Как вычисляются пределы пропорциональности, текучести и прочности?

31. Как вычисляются относительное остаточное удлинение и относительное остаточное сужение образца?

32. Какой вывод можно сделать по результатам лабораторной работы?

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Элементы машин (механизмов) и строительных конструкций могут испытывать сжатие. Прочность материалов оценивается по результатам их испытания 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 расчетное сопротивление.

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 прессы приводит к увеличению разброса результатов ис-

питания. В некоторых случаях для устранения влияния трения опорные поверхности (торцы) образцов шлифуют и смазывают графитовой пастой.

Испытательная машина

Испытание проводится на гидравлическом прессе, который способен создать сжимающую силу до 500 кН (Р-50). Испытательная машина имеет силоизмеритель и записывающее устройство для построения диаграммы деформирования.

Измерительные приборы и инструменты

Для определения размеров образца до испытания и после него используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

Форма и размеры испытываемых образцов на сжатие

Стальной образец имеет форму цилиндра, диаметр и высота которого 20 мм. При изготовлении образцов для испытания на сжатие для исключения потери устойчивости должно выполняться требование, чтобы высота образца не превышала трех диаметров.

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 1,5.

Машинные диаграммы испытания образцов из пластических и хрупких материалов

Диаграмма сжатия и форма разрушения стального образца

На начальном этапе испытания машинная диаграмма имеет прямой вид, что подтверждает соблюдение закона Гука (рис. 2.1). 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.

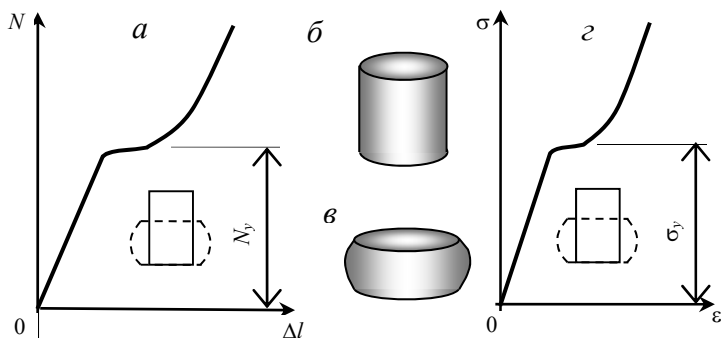


Рис. 2.1. Машинная диаграмма (а), вид стального образца до (б) и после испытания (в) и диаграмма напряжений (з)

Диаграмма сжатия и форма разрушения чугунного образца

Диаграмма сжатия чугунного образца имеет выраженный криволинейный характер (рис. 2.2). 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° 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_{ll} . Дальнейшее деформирование образца приводит к появлению на его поверхности новых трещин и выкрашиванию частиц чугуна.

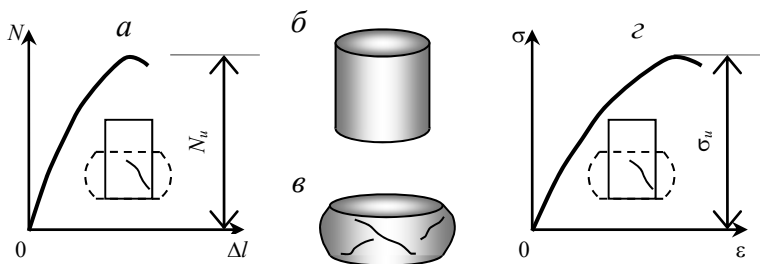


Рис. 2.2. Машинная диаграмма (а), вид чугунового образца до испытания (б), после испытания (в) и диаграмма напряжений (z)

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.

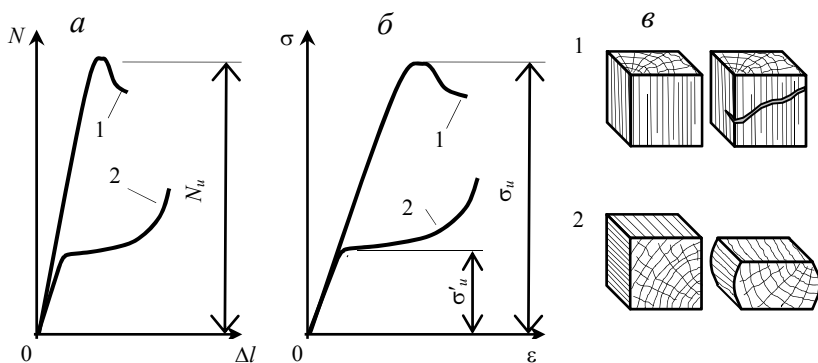


Рис. 2.3. Машинная диаграмма (а), диаграмма напряжений (б) и вид деревянного образца (в) при испытании на сжатие вдоль (1) и поперек волокна (2)

Диаграммы деформирования деревянного образца на сжатие вдоль волокна (1) и на сжатие поперек волокна (2) существенно отличаются друг от друга (см. рис. 2.2). Диаграмма, полученная при испытании образца на сжатие вдоль волокна (1), представляет собой зависимость, близкую к прямолинейной, лишь в конце испытания наблюдается уменьшение нагрузки. Максимальная сжимающая си-

ла на диаграмме соответствует усилию предела прочности. В момент разрушения в образце за счет сдвигов образуются трещины, расположенные под углом 45° к линии действия силы.

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

Порядок проведения испытания и обработка результатов

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

Порядок проведения испытания

1. Ознакомиться с устройством испытательной машины и ее принципиальной схемой действия. Записать тип машины, цену деления шкалы силоизмерительного устройства, масштаб построения диаграммы по нагрузке и по деформации.

2. Измерить высоту и диаметр для стального и чугунного образца, высоту и размеры квадратного сечения для деревянного образца до испытания.

3. Установить образец между плитами испытательной машины. Для исключения изгиба образца один из захватов должен иметь шаровую опору. При испытании древесины на сжатие вдоль волокна линия действия силы должна быть параллельной 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: получение прямолинейного участка диаграммы, площадки текучести, области упрочнения, образование трещин и разрушение образца.

5. После разрушения образца выключить испытательную машину (пресс), вынуть из захватов образец, изучить форму образца и образцовые трещины. Измерить размеры образца после испытания.

6. Записать значение наибольшей нагрузки, отмеченной на шкале силоизмерительного устройства дополнительной «инертной» стрелкой.

7. Снять с барабана бумагу с диаграммой сжатия.

8. Приступить к обработке результатов и оформлению отчета о лабораторной работе.

Обработка результатов испытания и оформление отчета

1. После испытания чугунного и деревянного образцов на шкале силоизмерителя прессы снять значение усилий, соответствующее пределу прочности. Для образца из стали установить силу, соответствующую пределу текучести, и максимальное усилие, достигнутое при испытании.

2. Осмотреть образцы до и после испытания, изобразить их и имеющиеся на них трещины, измерить высоту, диаметр для чугунного и стального образцов и стороны сечения деревянного образца.

3. По опытным данным перечертить в журнал лабораторных работ машинные диаграммы сжатия для стали, чугуна и древесины.

4. Для хрупких материалов (чугуна и древесины) определить пределы прочности и относительные остаточные укорочения:

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

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

A_0 – площадь поперечного сечения чугунного и деревянного образцов до испытания;

h_0 – высота чугунного и деревянного образцов до испытания;

h_r – высота чугунного и деревянного образцов после испытания.

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

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

где N_y – сила, соответствующая пределу текучести стали;

A_0 – площадь поперечного сечения стального образца до испытания;

H_0 – высота стального образца до испытания;

N_{\max} – максимальная сила испытания стали;

h_r – высота стальных образцов после испытания.

6. Для чугуна и древесины определить расчетные сопротивления, приняв коэффициент безопасности по материалу $\gamma_m = 2,5$:

$$R_c = \frac{\sigma_u}{\gamma_m}.$$

7. Проанализировать полученные результаты испытания и сделать вывод.

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

Контрольные вопросы

1. Почему для пластичных материалов невозможно определить предел прочности на сжатие?

2. В чем особенность прочности хрупких материалов?

3. Какая цель ставится при выполнении лабораторной работы?

4. Какие требования предъявляются при испытании образцов на сжатие?

5. На какой испытательной машине проводились испытания образцов на сжатие?

6. Какие измерительные инструменты использовались в лабораторной работе?

7. Какую форму и размеры имели образцы из стали, чугуна и древесины?

8. Какую форму имеет машинная диаграмма испытания и диаграмма напряжений стального образца?

9. Почему нельзя добиться разрушения стального образца при испытании на сжатие?

10. Какую форму имеет машинная диаграмма испытания и диаграмма напряжений чугунного образца на сжатие?

11. Какому усилию соответствует в лабораторной работе высшая точка диаграммы сжатия для образца из чугуна?

12. Почему для чугуна закон Гука может быть применен только приближенно?

13. Почему диаграммы сжатия образцов из чугуна и древесины не имеют площадки текучести?

14. Что появляется на поверхности чугунного образца в момент его разрушения?

15. С какого места на диаграмме начинается образование трещин на образце из чугуна?

16. Чем отличаются машинные диаграммы древесины при испытании ее на сжатие вдоль и поперек волокон?

17. Какому усилию соответствует высшая точка диаграммы сжатия вдоль волокон для образца из древесины?

18. Чем отличается характер разрушения образцов из древесины при сжатии вдоль волокна и при сжатии поперек волокна?

19. С какой точки диаграммы появляются площадки сдвига в образце из древесины при сжатии вдоль волокон?

20. Почему на машинной диаграмме испытания образца из древесины поперек волокон появляется площадка текучести?

21. Как (по каким формулам) вычисляются пределы прочности для чугуна и для древесины?

22. Как (по каким формулам) для стали вычисляются предел текучести, максимальное напряжение испытания и относительное остаточное укорочение?

23. Какие механические характеристики определялись в лабораторной работе для образца из чугуна и древесины?

24. Какие механические характеристики определялись в лабораторной работе для образца из стали?

25. Как определяются расчетные сопротивления для чугуна и древесины?

26. Какая величина обозначена γ_m ? В каких единицах она измеряется?

27. Какие материалы, испытанные в лабораторной работе, являются хрупкими?

28. Какие материалы, испытанные в лабораторной работе, являются пластичными?

29. Какие выводы сделаны по результатам испытания стали, чугуна и древесины?

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Физическая постоянная E называется модулем упругости I рода (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 (коэффициентом Пуассона) ν . *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 коэффициента 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 испытательная машина Р-5 механического привода, способная развить нагрузку 50 кН.

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 помо-

шью датчиков сопротивления с базой $l_0 = 20$ мм и измерителем деформации цифровым ИДЦ-1. Цена деления прибора указана на шкале и составляет $\alpha = 10^{-5}$, значение коэффициента чувствительности $K = 2,05$ указано в паспорте прибора.

Датчики и используемый образец

Испытание проводится на стальном образце прямоугольного сечения (рис. 3.1). На широкой грани образца наклеено 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.

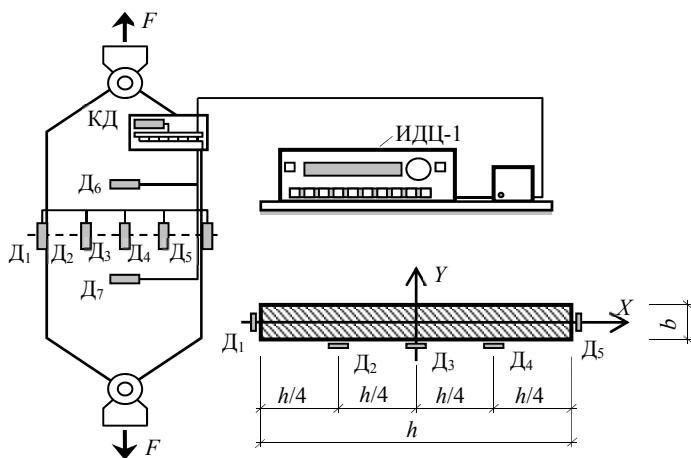


Рис. 3.1. Схема образца с датчиками и подключенным прибором ИДЦ-1

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.

Порядок проведения испытаний и обработка результатов

Порядок проведения испытаний

1. Ознакомиться с основными узлами и принципом работы испытательной машины.
2. Ознакомиться с образцом, узлами его крепления и наклеенными на нем 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 где он расположен.
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. Нагружать образец ступенями, последовательно снимать отсчеты по каждому из семи датчиков и записать их в журнал.
8. После завершения испытания разгрузить образец и выключить пресс.

Заполнение таблицы результатов испытания

По мере проведения испытаний в таблицу заносятся отсчеты по нагрузке N и показания прибора по каждому из семи датчиков n . Далее следует определить приращения нагрузки ΔN и показаний прибора Δn на каждой ступени нагружения для каждого датчика. Для этого из последующего отсчета следует вычесть предыдущий отсчет и записать результат в позицию, расположенную между строками соответствующих нагрузок. Затем по приращениям нагрузки и показаниям прибора, соответствующих каждому датчику, вычисляются 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 выберем один датчик (например, третий) из первых пяти и шестой или седьмой датчик. Так как отсчеты n пропорциональны ε , то график деформаций можно построить используя значения отсчетов n и значения нагрузки N .

Поместить первую точку графика в начале системы координатных осей n и N . От нуля на горизонтальной оси отложить приращение Δn , соответствующее первой ступени нагружения, а на вертикальной оси – приращение ΔN , соответствующее приращению нагрузки, и отметить точку с полученными координатами. Затем от полученных координат второй точки отложить приращение Δn , соответствующее второй ступени нагружения, и ΔN , соответствующее приращению нагрузки. Получим координаты третьей точки и т. д. Соединяя полученные точки штриховыми прямыми, построим ломаную линию. Далее через полученные точки следует провести прямую так, чтобы отклонение этих точек от проведенной прямой было бы минимальным (рис. 3.2).

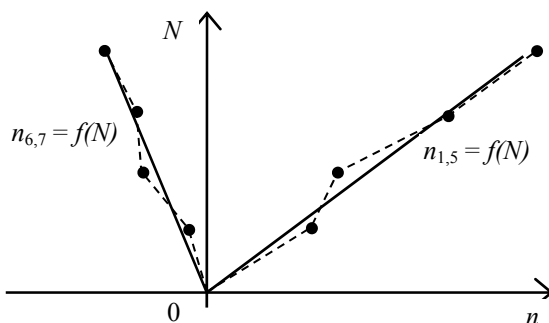


Рис. 3.2. Графики зависимости отсчетов по прибору от значения растягивающей силы

Необходимо 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 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.

Эпюра продольных деформаций

По результатам, полученным для первых пяти датчиков, можно построить эпюру смещения точек поперечного сечения образца. В точках, где наклеены первые пять датчиков, следует отложить соответствующие значения средних приращений показаний прибора Δn_{mi} , затем полученные точки соединить прямыми отрезками. В результате получим ломаную линию, которая изображает эпюру продольных деформаций по ширине поперечного сечения образца (рис. 3.3).

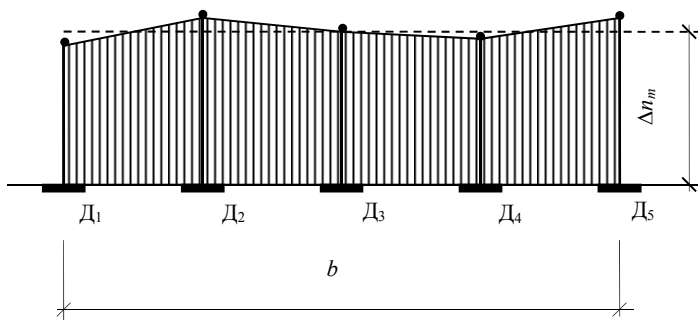


Рис. 3.3. Эпюра продольных деформаций по ширине поперечного сечения

Далее следует среднеарифметическое значение средних приращений отсчетов по первым пяти датчикам:

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

Отложим полученную величину на графике от линии построения и проведем 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 выполнять в следующем порядке:

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

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} \leq \sigma_{pr}.$$

2. Определить среднее приращение напряжения на ступени нагружения:

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta N_m}{A_0} = \frac{\Delta N_m}{hb}.$$

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

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{2\Delta n_m \alpha}{K}.$$

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

$$\Delta\varepsilon'_m = \frac{2\Delta n'_m \alpha}{K}.$$

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

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

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

$$E = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\varepsilon_m}.$$

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 ν со значениями, приведенными в справочниках, и сделать вывод.

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

Контрольные вопросы

1. Что характеризует модуль упругости?
2. От чего зависит значение модуля упругости?
3. Что характеризует коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)?
4. Что называется коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом Пуассона)?
5. От чего зависит значение коэффициента поперечной деформации?

6. Какие значения может принимать коэффициент Пуассона для изотропных материалов?
7. Как формулируется гипотеза Бернулли?
8. Для каких материалов справедлив закон Гука?
9. Чем объясняется нелинейность деформирования большинства материалов?
10. При каких условиях соблюдается гипотеза Бернулли?
11. Какая цель поставлена при выполнении лабораторной работы?
12. Какие требования при проведении испытания заданы в лабораторной работе?
13. Какая испытательная машина использована для выполнения опыта?
14. Какие приборы и инструменты используются при выполнении лабораторной работы?
15. Какие датчики используются в лабораторной работе?
16. Как на образце расположены рабочие датчики, предназначенные для измерения продольных деформаций?
17. Как на образце расположены датчики, предназначенные для измерения поперечных деформаций?
18. Какое направление в опыте считается продольным, а какое – поперечным?
19. Как датчики закрепляются на образце?
20. Какую форму имеет образец и из какого материала он изготовлен?
21. Для чего служит компенсирующий датчик и где он расположен?
22. В какой последовательности выполняется испытание?
23. Как заполняется таблица результатов и как обрабатываются данные?
24. Как строятся графики продольных и поперечных деформаций?
25. Что выражают графики продольных и поперечных деформаций?
26. Как вычисляется и для чего необходимо значение максимального напряжения в образце?
27. Как определяется приращение напряжения на ступени нагружения?
28. Как в лабораторной работе определяется относительная продольная деформация?
29. Как в лабораторной работе определяется относительная поперечная деформация?

30. Как вычисляется коэффициент поперечной деформации (коэффициента Пуассона)?

31. Как вычисляется значение модуля упругости (модуля Юнга)?

32. Какие выводы можно сделать по результатам испытания?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 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 ν является производной величиной и может быть найден как опытным, так и теоретическим способом. Для изотропных материалов между этими величинами существует зависимость

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

Определить значение модуля G непосредственно из опыта на сдвиг (срез) не представляется возможным. Это связано с тем, что в опыте обеспечить деформацию чистого сдвига, то есть 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 кручения. Закон Гука при кручении выражается зависимостью

$$\Delta\varphi = \frac{T \cdot l}{G \cdot I_p},$$

где $\Delta\varphi$ – абсолютная угловая деформация;

T – крутящий момент на участке стержня;

l – длина участка стержня;

G – модуль сдвига;

I_p – полярный момент инерции поперечного сечения.

Цель испытания

Опытным путем определить 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 , ν).

Исходные данные

Требования к испытанию

Опытный образец следует нагружать крутящим моментом ступенчато. 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. 4.1). Нагружение опытного образца выполняется с помощью гири, перемещающейся по размеченному стальному стержню (рычагу). Максимальный создаваемый крутящий момент не должен превышать 20 Н·м.

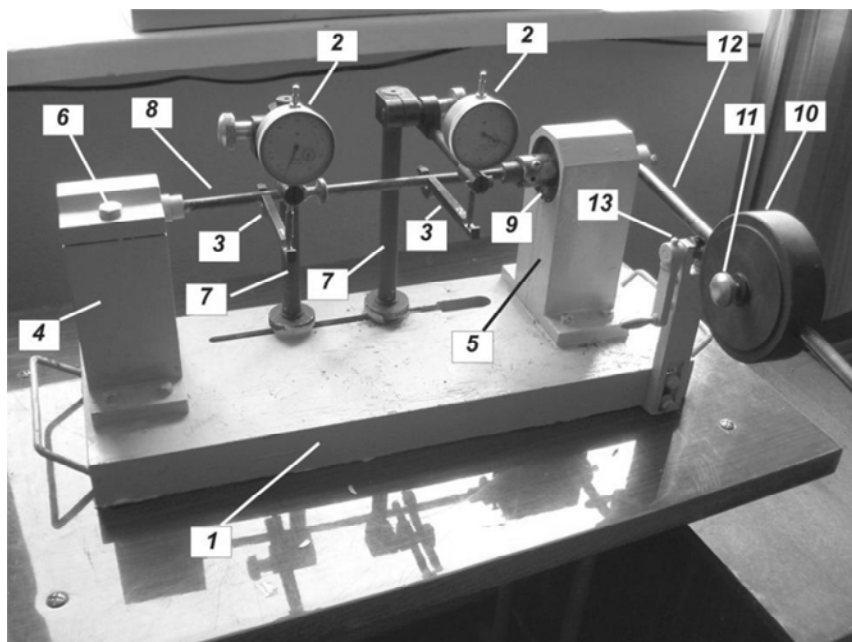


Рис. 4.1. Настольная установка для определения модуля сдвига:
 1 – станина; 2 – механические тензометры (индикаторы часового типа);
 3 – трубки; 4, 5 – опоры; 6 – зажимной винт; 7 – штативы; 8 – образец
 (стальной стержень круглого сечения); 9 – подшипник; 10 – гиря; 11 – стопорный
 винт; 12 – рычаг (стальной стержень с разметкой); 13 – опора с кривошипом

Все детали установки закреплены на 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 другой 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, создаваемый гирей 10.

В монтажной щели установлены два штатива 7, которые удерживают два механических тензометра 2. С помощью трубок 3 к образцу прикреплены стержни длиной L , расстояние между которыми является базой измерения и равно l . Измерительные стержни

механических тензометров опираются в 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 струбцин 3, отстоящих на расстояние L от оси стержня. Так как углы поворота сечений малы, то определить их 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 $a = 0,01$ 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 ΔT и показаний приборов Δn на каждой ступени нагружения. Для этого из последующего отсчета вычесть предыдущий отсчет и результат записать в позицию, расположенную между строками соответствующих нагрузок. Затем вычисляются 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. 4.2). Так как отсчеты по приборам n пропорциональны углам поворота, то график деформаций можно построить, используя значения отсчетов n и значения нагрузки T . Для этого первую точку графика поместить в начало системы координатных осей n и T , на горизонтальной оси отложить от нуля приращение Δn , соответствующее первой ступени нагружения, а на вертикальной оси – ΔT , соответствующее приращению нагрузки, и отметить точку с полученными координатами. Затем от полученных координат второй точки отложить Δn , соответствующее второй ступени нагружения, и ΔT , соответствующее приращению нагрузки. В результате получим координаты третьей точки и т. д. Соединяя полученные точки штриховыми прямыми, построим ломаную линию. Далее следует провести прямую через полученные точки так, чтобы отклонение этих точек от проведенной прямой было бы минимальным.

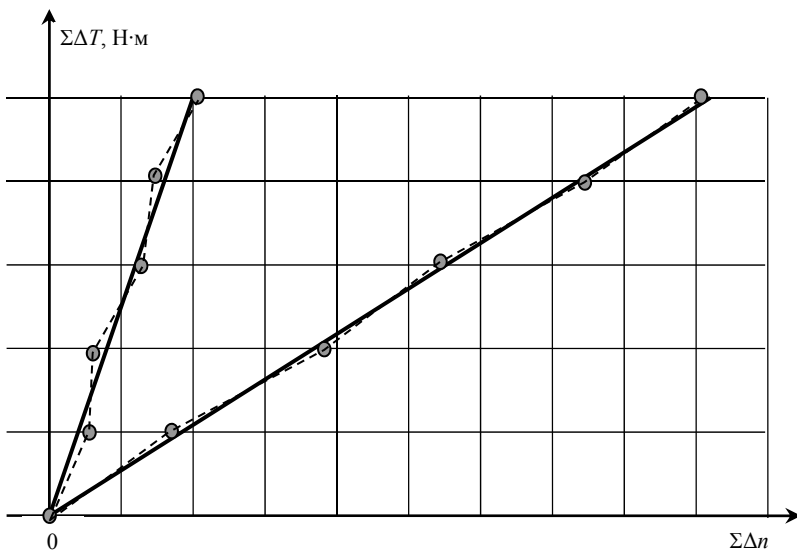


Рис. 4.2. Графики зависимости углов закручивания расчетных сечений стержня и крутящего момента

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

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

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

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_p}.$$

4. Сравнить полученное напряжение с пределом пропорциональности σ_{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:

$$\tau_{\max} \leq 0,55 \cdot \sigma_{pr}.$$

5. Определить среднее приращение углов поворота расчетных сечений образца

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

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

$\Delta n_{1m}, \Delta n_{2m}$ – средние приращения показаний стрелочных индикаторов;

α – цена деления стрелочного индикатора.

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

$$\Delta\theta_{12m} = \Delta\theta_{2m} - \Delta\theta_{1m}.$$

7. Используя закон Гука при кручении

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

определить модуль сдвига по результатам опыта:

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

8. Вычислить модуль сдвига по теоретической зависимости

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

Значения модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации для стали принять по справочнику.

9. Сравнить полученные результаты по формуле

$$\frac{G^{\text{теор}} - G^{\text{оп}}}{G^{\text{теор}}} \cdot 100, \%,$$

и сделать выводы.

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

Контрольные вопросы

1. Что характеризует модуль второго рода (модуль сдвига)?
2. Как выражается закон Гука при сдвиге?
3. Какая зависимость существует между модулем сдвига, модулем продольной упругости и коэффициентом поперечной деформации?
4. Почему определить модуль упругости непосредственно из опыта не представляется возможным?
5. Почему модуль сдвига удобнее определять при кручении?
6. Как выражается закон Гука при кручении?

7. Какая цель ставится в лабораторной работе при испытании образца на кручение?
8. Какие требования следует выполнять при проведении испытаний образца на кручение?
9. Какой образец использован для испытаний?
10. Как закреплен образец?
11. Где располагались расчетные сечения на образце?
12. Как определяется база измерения?
13. Какие приборы и инструменты использованы в опыте?
14. Что непосредственно измерялось стрелочными тензотрами?
15. Как определялись углы поворота расчетных сечений?
16. Каким способом нагружался образец?
17. Для чего служит опора с кривошипом?
18. Для чего служит стопорный винт?
19. По каким формулам вычислялись полярный момент инерции и полярный момент сопротивления поперечного сечения образца?
20. Как вычислялось значение максимального касательного напряжения? Для чего оно необходимо?
21. Какое условие поставлено при проведении опыта?
22. Как вычислялись среднее приращение крутящего момента и среднее приращение углов поворота расчетных сечений?
23. Как вычисляется средний угол закручивания рабочей части образца?
24. По какой формуле вычисляется модуль сдвига по результатам опыта?
25. Какие выводы можно сделать по результатам испытаний?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Многие элементы строительных конструкций испытывают плоский поперечный изгиб. Это балки перекрытий, фундаментные и подкрановые балки, балочные плиты. При плоском поперечном изгибе в сечениях балки возникают нормальные σ и касательные τ напряжения. Этот вид сопротивления более сложен, чем централь-

ное 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 их достоверности может быть оценена результатами испытания балок.

Цель испытания

Целью лабораторной работы является установление закона распределения нормальных напряжений по высоте заданного сечения балки, определение значения этих напряжений и сравнение 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, желательны равными, а также чтобы максимальная нагрузка на балку не вызвала напряжений, превышающих предел пропорциональности, то есть $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$.

Испытательная установка

Для проведения опыта используется специально изготовленный балочный испытатель (рис. 5.1). Объектом исследования является однопролетная стальная прокатная двутавровая балка 1, опирающаяся на шарнирно-неподвижную (слева) и на шарнирно-подвижную опоры (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. 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.

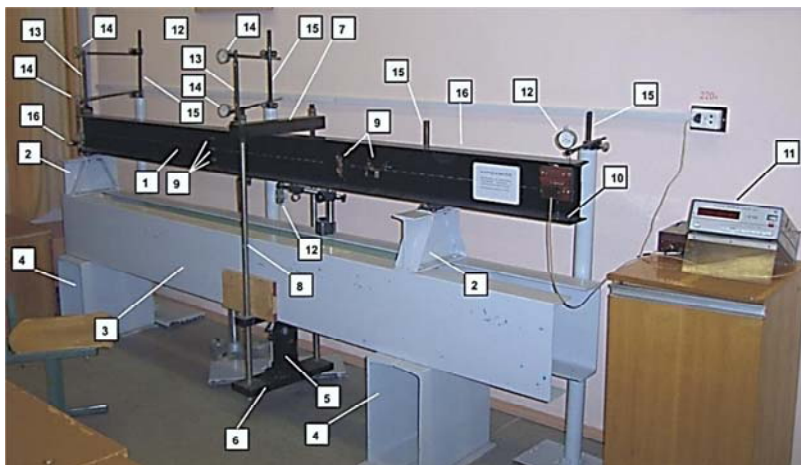


Рис. 5.1. Балочный испытатель:

- 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 тензометры для измерения прогибов балки; 13 – стержни, прикрепленные к балке; 14 – стрелочные тензометры, предназначенные для измерения углов поворота расчетных сечений; 15 – штативы, удерживающие стрелочные тензометры; 16 – стрелочные тензометры, предназначенные для измерения деформаций опор балки

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 наклеено 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.

Измерительные приборы и инструменты

В лабораторной работе для измерения пролета и консоли балки и 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 применялись проволочные датчики сопротивления и измеритель деформации ИДЦ-1 с ценой деления $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$. Отметим, что измеритель деформаций ИДЦ-1 предназначен для измерения относительных линейных деформаций, поэтому его цена деления α – безразмерная величина.

Порядок проведения испытания и обработка результатов

Порядок проведения испытания

1. Включить питание измерителя деформации ИДЦ-1.
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

Значения нагрузок и отсчеты по измерителю деформаций ИДЦ-1 записать в колонки F , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 таблицы результатов испытания.

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 ΔF и приращения показаний ИДЦ-1 Δn_1 , Δn_2 , Δn_3 , Δn_4 , Δn_5 и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных.

2. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки ΔF_m и средние значения приращений показаний прибора ИДЦ-1 для каждого датчика Δn_{1m} , Δn_{2m} , Δn_{3m} , Δn_{4m} , Δn_{5m} и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных.

3. Построить график зависимости деформации продольного волокна от нагрузки. Так как деформация продольного волокна прямо пропорциональна разности показаний ИДЦ-1 на ступени нагружения, на вертикальной оси вместо деформации откладывать 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 откло-

нений была минимальной. Из графиков (рис. 5.2) видно, 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 – 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.

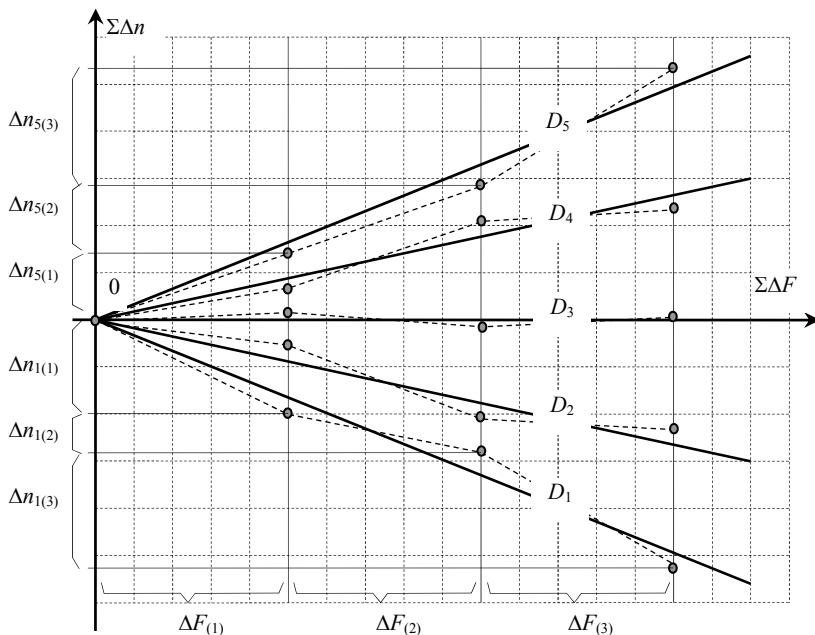


Рис. 5.2. Графики зависимости относительной линейной деформации от нагрузки (в скобках указан номер ступени нагружения, вне скобок – номер датчика)

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

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

5. Построить эпюру средних относительных линейных деформаций по высоте сечения балки (рис. 5.3), для чего в масштабе отложить вычисленные значения $\varepsilon_{i,m}$ и полученные точки соединить прямыми отрезками, затем провести прямую линию так, чтобы сумма отклонений была минимальной. Убедиться, что полученная эпюра относительных линейных деформаций (см. рис. 5.3) незначительно отклоняется от прямой. Это подтверждает гипотезу плоских сечений.

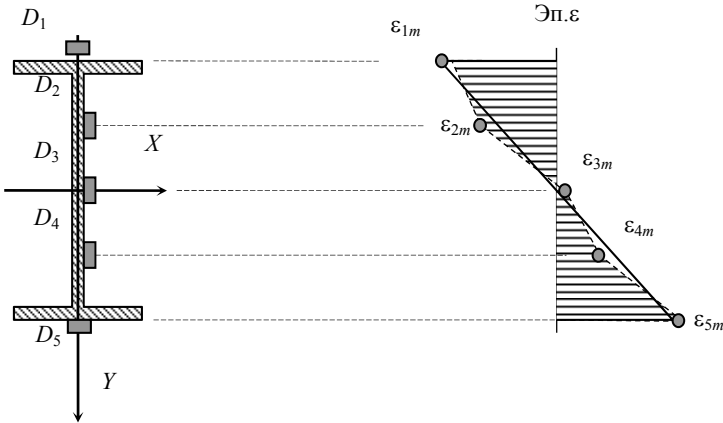


Рис. 5.3. Эпюра относительных линейных деформаций

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

$$\sigma_i = E\varepsilon_i.$$

Значение модуля упругости взять из справочника.

Результаты теоретического расчета

1. Построить расчетную схему балки с указанием места приложения нагрузки (рис. 5.4).

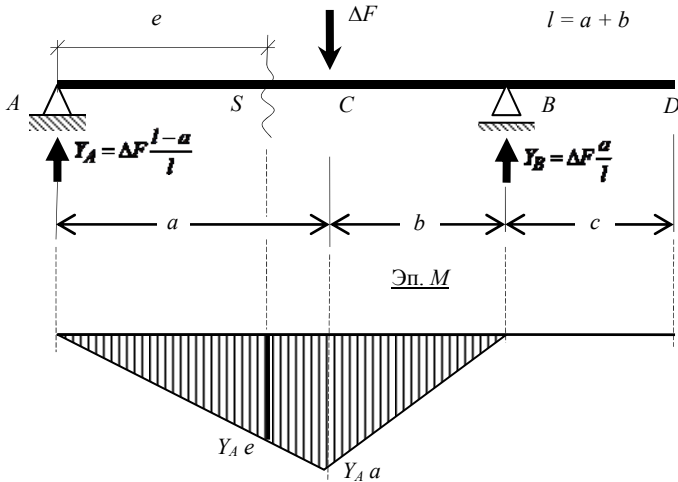


Рис. 5.4. Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов

2. Из уравнений равновесия

$$\sum M_A = \Delta F \cdot a - Y_B \cdot l = 0 \quad \text{и} \quad \sum M_B = Y_A \cdot l - \Delta F \cdot (l - a) = 0$$

вычислить реакции опор балки

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

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

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

4. Вычислить нормальные напряжения в точках расчетного сечения S:

$$\sigma_i = \frac{M_S}{I_X} \cdot y_i,$$

где y_i – координата точки сечения, в которой установлен датчик D_i (ось Y направить в сторону растянутых волокон; в данном случае вниз).

5. В расчетном сечении построить эпюры нормальных напряжений, полученных в опыте и теоретически (рис. 5.5).

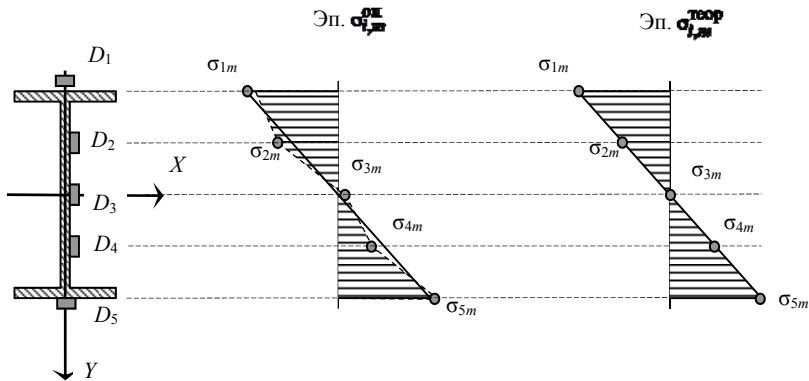


Рис. 5.5. Эпюры нормальных напряжений, полученных в опыте и теоретическим расчетом

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

$$D_i \% = \left| \frac{\sigma_i^{\text{оп}} - \sigma_i^{\text{теор}}}{\sigma_i^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% \quad (5.1)$$

Если в знаменателе формулы (5.1) для D_i % содержится ноль, значение D_i % не вычисляется, а в таблице ставится прочерк.

Сравнение опытных и теоретических результатов

Напряжения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_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 %

7. По полученным результатам сделать вывод.

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

Контрольные вопросы

1. Какие элементы строительных конструкций испытывают поперечный изгиб?
2. Какие гипотезы и допущения приняты в теории расчета тонких балок?
3. Какова цель лабораторной работы?
4. Какие требования предъявляются при испытании балки?
5. На какой установке проводится испытание балки на изгиб?
6. Что является объектом испытания на изгиб?
7. Каким образом опирается балка?
8. С помощью какого устройства осуществляется нагружение балки?
9. Для чего служит спаренная швеллерная балка?
10. Для чего измеряются высота сечения двутавра и средняя толщина полки?
11. Как выполняется снятие показаний прибора?
12. Как заполняется таблица опытных данных?
13. Как устроен датчик и по какому принципу в нем вырабатывается сигнал?
14. Как влияет температура на сопротивление металлических проводников?
15. Для чего служит компенсирующий датчик и где на опытной установке он расположен?
16. Какой принцип действия заложен в способе установки нуля, использованном в измерительном приборе ИДЦ-1?
17. Какая величина обозначена буквой α ?
18. Как строится график зависимости деформаций продольных волокон балки от нагрузки?
19. Какие выводы можно сделать, анализируя график деформации продольных волокон от нагрузки?
20. Как формулируется закон Гука?
21. Как вычисляются средние линейные деформации продольных волокон балки в местах установки датчиков?
22. Как строится эпюра средних относительных линейных деформаций по высоте сечения балки?
23. Какая гипотеза подтверждается эпюрой средних относительных линейных деформаций по высоте сечения балки?

24. Как вычисляются средние нормальные напряжения по результатам опыта?
25. Как вычисляются реакции опор балки?
26. Как вычисляются максимальный и расчетный изгибающие моменты?
27. По какой формуле вычисляются теоретические значения нормальных напряжений в точках расчетного сечения балки?
28. Какие величины обозначены буквами y_i , M_X , I_X ?
29. Почему ось Y следует направлять вниз?
30. Как строятся эпюры нормальных напряжений, полученных в опыте и теоретическим расчетом?
31. По какой зависимости распределяются нормальные напряжения по высоте поперечного сечения?
32. В каких точках сечения балки появляются максимальные нормальные напряжения?
33. В каких точках поперечного сечения балки появляются нулевые нормальные напряжения?
34. Что называется нейтральным слоем и нейтральной осью балки?
35. Как расположена нейтральная ось в балке при плоском поперечном изгибе?
36. Какой вывод можно сделать по результатам сравнения нормальных напряжений, полученных в опыте и теоретическим расчетом?

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 максимальны, 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 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 приведены на рис. 5.1 (лабораторная работа № 5). 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-1) с ценой деления $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ и измерительная стальная линейка (лента). Схема установки с расположением датчиков приведена на рис. 6.1.

Схема установки с указанием расположения датчиков и приборов

Исследуемая балка является шарнирно опертой и нагружена 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 расположен под углом 45° к оси балки. Отметим, что взаимно перпендикулярная пара датчиков может располагаться произвольно по отношению к осям 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-1 измеряются относительные продольные деформации волокон в рабочем направлении этих датчиков, которые затем используются для определения главных напряжений в опытных точках.

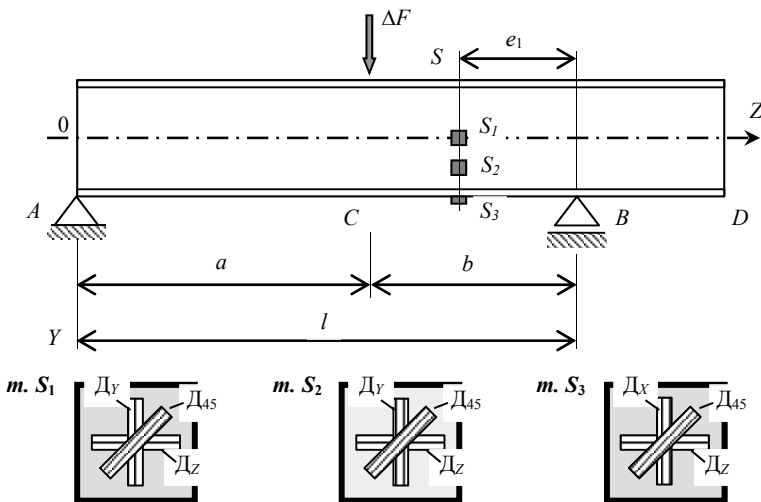


Рис. 6.1. Схема балки с указанием положения датчиков

Порядок проведения испытания и обработка результатов

Порядок проведения испытания

1. Включить питание измерителя деформации ИДЦ-1.
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, нажимая кнопку прибора «Пуск», фиксировать отсчеты по прибору и заносить их значения в журнал испытания.
10. Повторить действия при нагружения балки второй, третьей и т. д. ступенями нагружения.
11. После завершения испытания снять нагрузку с балки. Для этого необходимо открыть клапан и выпустить масло из цилиндра, повернув рычаг гидравлического домкрата против хода часовой стрелки.

Заполнение таблицы результатов испытания

Для исследований выбрать точку S_3 и любую из точек S_1 или S_2 . Значения нагрузок и отсчеты по измерителю деформаций ИДЦ-1 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 (табл. 6.1).

Таблица 6.1

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	Δn_1	n_2	Δn_2	n_3	Δn_3	n_7	Δn_7	n_8	Δn_8	n_9	Δn_9
F	ΔF												
F_1	ΔF_{12}	$n_{1(1)}$	$\Delta n_1^{(21)}$	$n_{2(1)}$	$\Delta n_2^{(21)}$	$n_{3(1)}$	$\Delta n_3^{(21)}$	$n_{7(1)}$	$\Delta n_7^{(21)}$	$n_{8(1)}$	$\Delta n_8^{(21)}$	$n_{9(1)}$	$\Delta n_9^{(21)}$
F_2	ΔF_{23}	$n_{1(2)}$	$\Delta n_1^{(32)}$	$n_{2(2)}$	$\Delta n_2^{(32)}$	$n_{3(2)}$	$\Delta n_3^{(32)}$	$n_{7(2)}$	$\Delta n_7^{(32)}$	$n_{8(2)}$	$\Delta n_8^{(32)}$	$n_{9(2)}$	$\Delta n_9^{(32)}$
F_3	ΔF_{34}	$n_{1(3)}$	$\Delta n_1^{(43)}$	$n_{2(3)}$	$\Delta n_2^{(43)}$	$n_{3(3)}$	$\Delta n_3^{(43)}$	$n_{7(3)}$	$\Delta n_7^{(43)}$	$n_{8(3)}$	$\Delta n_8^{(43)}$	$n_{9(3)}$	$\Delta n_9^{(43)}$
F_4	ΔF_{45}	$n_{1(4)}$	$\Delta n_1^{(54)}$	$n_{2(4)}$	$\Delta n_2^{(54)}$	$n_{3(4)}$	$\Delta n_3^{(54)}$	$n_{7(4)}$	$\Delta n_7^{(54)}$	$n_{8(4)}$	$\Delta n_8^{(54)}$	$n_{9(4)}$	$\Delta n_9^{(54)}$
F_5	ΔF_{56}	$n_{1(5)}$	$\Delta n_1^{(65)}$	$n_{2(5)}$	$\Delta n_2^{(65)}$	$n_{3(5)}$	$\Delta n_3^{(65)}$	$n_{7(5)}$	$\Delta n_7^{(65)}$	$n_{8(5)}$	$\Delta n_8^{(65)}$	$n_{9(5)}$	$\Delta n_9^{(65)}$
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.

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 ΔF и приращения показания ИДЦ-1 Δn_1 , Δn_2 , Δn_3 (Δn_4 , Δn_5 , Δn_6 или Δn_7 , Δn_8 , Δn_9) для каждой ступени нагружения.

2. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки ΔF_m и средние значения приращений показаний прибора ИДЦ-1 для каждого датчика Δn_{1m} , Δn_{2m} , Δn_{3m} (Δn_{4m} , Δn_{5m} , Δn_{6m} или Δn_{7m} , Δn_{8m} , Δn_{9m}) и записать их в соответствующие позиции таблицы опытных данных (см. табл. 6.1).

3. Построить график зависимости деформации продольного волокна от нагрузки. Для этого воспользоваться показаниями, полученными по датчикам 9 или 6. Так как деформация продольного волокна прямо пропорциональна разности показаний ИДЦ-1 на ступени нагружения, на вертикальной оси вместо деформации следует откладывать 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 провести сплошную прямую линию так, чтобы отклонение от нее отмеченных точек было минимально. По графику (рис. 6.2) убедиться, что закон изменения относительной линейной деформации продольного волокна от нагрузки действительно близок к прямолинейному. Следовательно, закон Гука выполняется.

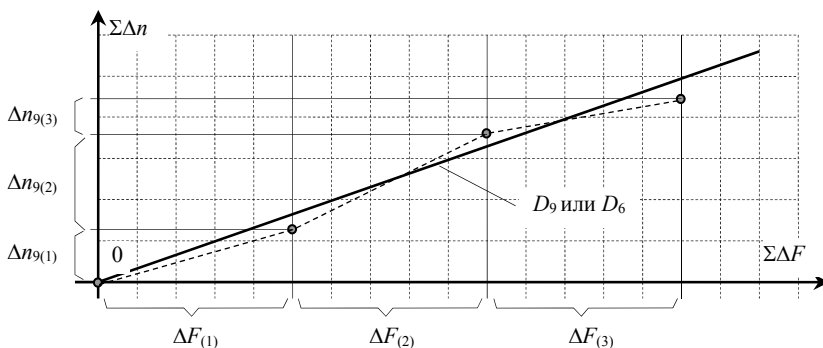


Рис. 6.2. График зависимости относительной линейной деформации от нагрузки (в скобках указан номер ступени нагружения)

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

$$\varepsilon_{i,m} = \frac{2\Delta n_{i,m} \alpha}{K}. \quad (6.1)$$

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

$$\gamma_{yz} = \varepsilon_y + \varepsilon_z - 2\varepsilon_{45}. \quad (6.2)$$

6. Найти экстремальные относительные деформации материала в исследуемых точках:

$$\varepsilon_{\max/\min} = \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_z}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_{45})^2}. \quad (6.3)$$

7. Определить экстремальные нормальные напряжения в исследуемых точках:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\max} + \nu\varepsilon_{\min}); \quad \sigma_{\min} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\min} + \nu\varepsilon_{\max}). \quad (6.4)$$

8. Вычислить наибольшие касательные напряжения:

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \gamma_{yz}^2}. \quad (6.5)$$

9. Определить направление главных осей деформации:

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \left| \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_z - 2 \cdot \varepsilon_{45}}{\varepsilon_y - \varepsilon_z} \right|. \quad (6.6)$$

Так как материал двутавровой балки является изотропным, то направление осей главных деформаций и направления главных напряжений совпадают. Направление большего экстремального напряжения показать, откладывая угол α_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:

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

Результаты теоретического расчета

1. Построить расчетную схему балки с указанием места приложения нагрузки и расположения расчетного сечения (рис. 6.3).

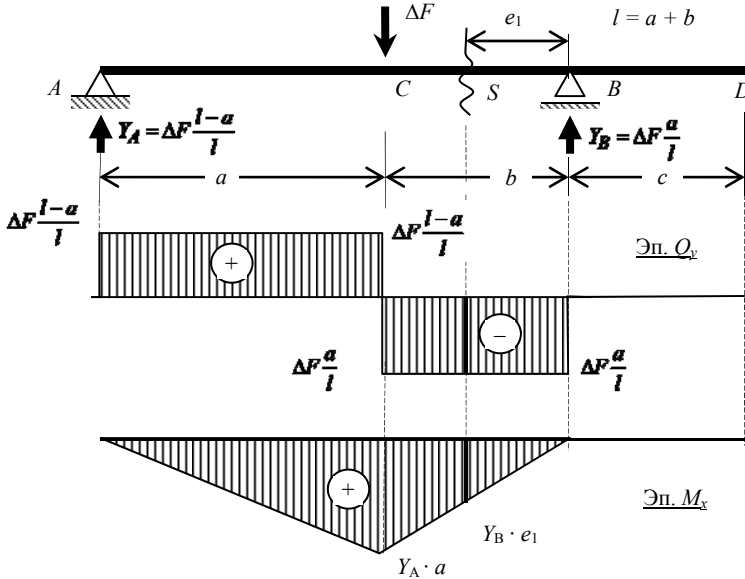


Рис. 6.3. Расчетная схема балки и эпюры M_x и Q_y

2. Из уравнений равновесия

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

вычислить реакции опор балки:

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

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

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

4. Вычислить нормальные напряжения в точках расчетного сечения

$$\sigma_i = \frac{M_S}{I_X} \cdot y_i, \quad (6.7)$$

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

i – номер расчетной точки.

Ось Y направить в сторону растянутых волокон, в данном случае вниз.

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

$$\tau_i = \frac{Q_y \cdot S_{xi}^0}{I_X \cdot s}, \quad (6.8)$$

где Q_y – поперечная сила в расчетном сечении;

S_x^0 – статический момент отсеченной части сечения балки.

I_x – момент инерции поперечного сечения двутавровой балки;

s – толщина стенки двутавра;

Статический момент отсеченной части сечения вычислить для точки S_2 по формуле

$$S_{x2}^0 = S_x^0 - \frac{h}{4} \cdot s \cdot \frac{h}{8} = S_x^0 - \frac{h^2 \cdot s}{32}, \quad (6.9)$$

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

$$\tau_{i,\max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + 4 \cdot \tau_i^2}. \quad (6.10)$$

7. Определить экстремальные максимальные нормальные напряжения

$$\sigma_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\sigma_i}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + 4 \cdot \tau_i^2}. \quad (6.11)$$

8. Определить положение главных площадок (направление главных напряжений)

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot \tau_i}{\sigma_i}\right). \quad (6.12)$$

9. Показать элемент, построенный из главных площадок (рис. 6.4).

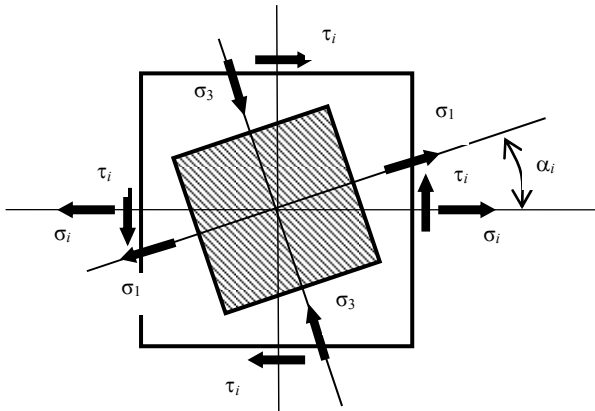


Рис. 6.4. Положение элемента с главными площадками и главными напряжениями

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

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

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

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

$$D_i \% = \left| \frac{\alpha_i^{\text{оп}} - \alpha_i^{\text{теор}}}{\alpha_i^{\text{теор}}} \right| \cdot 100 \% .$$

Здесь i – номер точки (S_1, S_2, S_3).
Результаты свести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Сравнение опытных и теоретических результатов

Точки	$S_1 (S_2)$				S_2			
	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	τ_{\max} , МПа	α_0 , град	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	τ_{\max} , МПа	α_0 , град
Опытная	$\sigma_{\max}^{\text{оп}}$	$\sigma_{\min}^{\text{оп}}$	$\tau_{\max}^{\text{оп}}$	$\alpha_0^{\text{оп}}$	$\sigma_{\max}^{\text{оп}}$	$\sigma_{\min}^{\text{оп}}$	$\tau_{\max}^{\text{оп}}$	$\alpha_0^{\text{оп}}$
Теоретическая	$\sigma_{\max}^{\text{теор}}$	$\sigma_{\min}^{\text{теор}}$	$\tau_{\max}^{\text{теор}}$	$\alpha_0^{\text{теор}}$	$\sigma_{\max}^{\text{теор}}$	$\sigma_{\min}^{\text{теор}}$	$\tau_{\max}^{\text{теор}}$	$\alpha_0^{\text{теор}}$
Отличие, %	$D_{\sigma \max}$	$D_{\sigma \min}$	$D_{\tau \max}$	D_{α}	$D_{\sigma \max}$	$D_{\sigma \min}$	$D_{\tau \max}$	D_{α}

11. По полученным результатам сделать вывод.

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

Контрольные вопросы

1. Какие внутренние силы появляются в сечениях балки при поперечном изгибе?
2. Какое напряженное состояние испытывают волокна балки, расположенные на уровне нейтрального слоя?
3. Какое напряженное состояние испытывают крайние волокна балки?
4. Почему в точках сечения балки, расположенных между крайними и нейтральными волокнами, материал испытывает плоское напряженное состояние?
5. Какая цель поставлена в данной лабораторной работе?
6. На какой установке выполняется испытание балки?
7. Какие приборы и инструменты используются при проведении испытаний?
8. Где расположены рабочие и компенсирующий датчики?
9. Как ориентированы направления рабочих датчиков в розетках?
10. С помощью какого устройства выполнялось нагружение балки?
11. Что измерялось с помощью датчиков?
12. Каким прибором измерялись деформации в расчетных точках?
13. Как заполнялась таблица опытных данных?
14. Как строился график зависимости относительной линейной деформации от нагрузки?
15. Какой вывод можно сделать, проведя анализ графика зависимости деформации от нагрузки?
16. По какой формуле вычислялись опытные углы сдвига материала?
17. По какой формуле определялись опытные экстремальные линейные деформации материала?
18. Как определялись опытные экстремальные нормальные напряжения?
19. Как вычислялось опытное максимальное касательное напряжение?
20. Как определялись направления главных осей деформации по опытным данным?
21. Почему направления главных осей деформации и главных напряжений совпадают?

22. Как определяется направление большего и меньшего главных напряжений?
23. Как расставляются индексы в главных напряжениях?
24. Как вычислялись реакции опор и строились эпюры для принятой расчетной схемы?
25. По какой формуле вычислялись теоретические значения нормальных напряжений в расчетных точках сечения балки?
26. По какой формуле вычислялись теоретические значения касательных напряжений в расчетных точках сечения балки?
27. Как вычислялись статические моменты отсеченной части сечения балки для расчетных точек?
28. По какой формуле вычислялось теоретическое значение максимального касательного напряжения?
29. Как вычислялись теоретические значения экстремальных нормальных напряжений в расчетных точках балки?
30. По какой формуле вычислялся теоретически угол наклона главных площадок?
31. Как выполнялось сравнение опытных и теоретических результатов?
32. Какой вывод можно сделать по результатам испытания балки?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

При расчете изгибаемых элементов зданий и 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 эстетические требования к помещениям, 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 θ 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 являются приближенными. Для тонких балок с отношением их 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 лабораторной работе № 5. Для измерения деформаций используются приборы – 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 (см. рис. 5.1). Определение углов поворота сечения на левой опоре 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 и расстояния от левой опоры до расчетного сечения использовалась стальная лента, для измерения высоты сечения и средней толщины полки двутавра – 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 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, на всех тензо-метрах установить нулевой отсчет.

9. Снять отсчеты по всем восьми стрелочным тензомерам 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

Значения нагрузок и отсчеты по стрелочным тензомерам записать в колонки F , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 , n_6 , n_7 , n_8 таблицы результатов испытания.

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 ΔF и приращения показания стрелочных тензометров Δn_1 , Δn_2 , Δn_3 , Δn_4 , Δn_5 , Δn_6 , Δn_7 , Δn_8 .

2. Построить графики зависимостей прогибов балки от нагрузки. Учítывая, что прогибы балки пропорциональны показаниям стрелочных тензометров, на вертикальной оси откладывать сумму приращений показаний прибора $\Sigma \Delta n_i$. На горизонтальной оси откладывать 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. 7.1) видно, что зависимости прогибов балки от нагрузки действительно близки к прямым линиям, поэтому делаем вывод о том, что закон Гука выполняется. Вблизи середины пролета (в точке S) прогиб направлен вниз, а на консоли (в точке D) – направлен вверх.

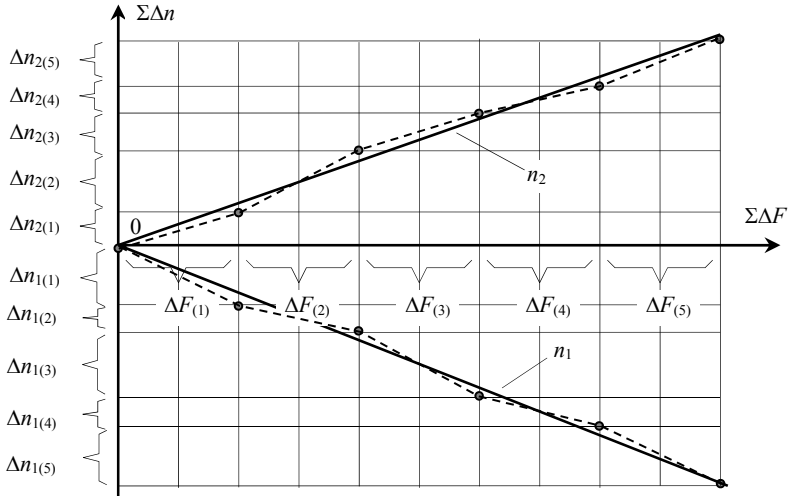


Рис. 7.1. Графики зависимости прогибов от нагрузки
(в скобках указан номер ступени нагружения)

3. Вычислить средние арифметические значения приращений нагрузки ΔF_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.

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

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. 7.2)

$$\theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{u_B - u_H}{d} = \frac{\Delta n_m^B \cdot a - \Delta n_m^H \cdot \alpha}{d} = \frac{(\Delta n_m^B - \Delta n_m^H) \cdot \alpha}{d},$$

где u_B, u_H – горизонтальные перемещения соответственно верхней и нижней точек стержня 13;

$\Delta n_m^B, \Delta n_m^H$ – среднее приращение показаний верхнего и нижнего приборов, установленных на стержне 13;

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

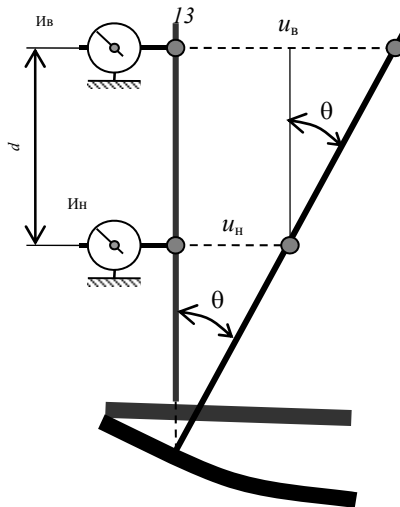


Рис. 7.2. Схема, поясняющая вычисление угла поворота сечения

5. Вычислить перемещение произвольной точки балки за счет осадок опор, предполагая, что балка остается прямолинейной. Согласно рис. 7.3 получим выражение

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

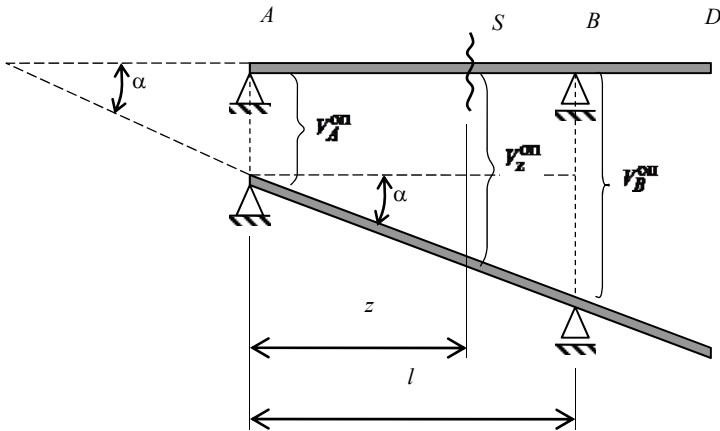


Рис. 7.3. Схема к определению перемещений точек балки, вызванных деформациями опор

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

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

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

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

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

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 ΔF . Для этого следует использовать уравнения равновесия

$$\sum M_A = \Delta F_m \cdot a - Y_B \cdot (a + b) = 0; \quad Y_B = \Delta F_m \frac{a}{a + b};$$

$$\sum M_B = Y_A \cdot (a + b) - \Delta F_m \cdot b = 0; \quad Y_A = \Delta F_m \frac{b}{a + b}.$$

10. Для определения прогибов балки и углов поворота ее расчетных сечений использовать метод начальных параметров. Составить универсальное уравнение упругой оси балки по расчетной схеме (рис. 7.4):

$$EIV = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot z + \frac{Y_A(z-0)^3}{6} \Big|_I - \frac{\Delta F_m(z-a)^3}{6} \Big|_{II} + \frac{Y_B(z-a-b)^3}{6} \Big|_{III}; \quad (7.1)$$

$$EI\theta = EI\theta_0 + \frac{Y_A(z-0)^2}{2} \Big|_I - \frac{\Delta F_m(z-a)^2}{2} \Big|_{II} + \frac{Y_B(z-a-b)^2}{2} \Big|_{III}. \quad (7.2)$$

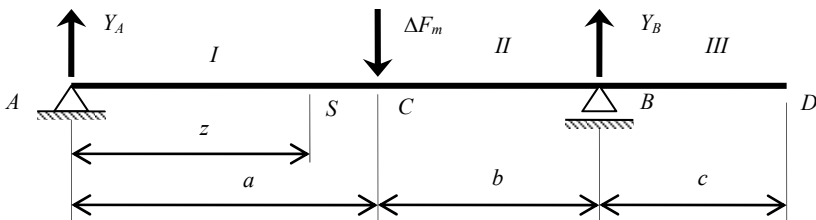


Рис. 7.4. Расчетная схема балки для определения прогибов и углов поворота

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 ($V = 0$):

$$EIV_A = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot 0 + \frac{Y_A(0-0)^3}{6} = 0. \quad (7.3)$$

Решение уравнения (7.3) 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 также должен быть равен нулю ($V = 0$):

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

Из полученного уравнения найти значение $EI\theta_0$ и значение второго начального параметра θ_0 .

12. Используя универсальное уравнение упругой оси балки (7.1), вычислить прогибы балки в расчетных точках S и D , задавая соответствующие значения координате z .

13. Используя уравнение для углов поворота (7.2), определить углы поворота сечения на опоре A и расчетного сечения S .

14. Сделать сравнение результатов, полученных испытанием балки и теоретическим расчетом, в форме таблицы.

Сравнение опытных и теоретических результатов

Величина	θ_A	θ_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	$\theta_A^{\text{теор}}$	$\theta_S^{\text{теор}}$	$V_S^{\text{теор}}$	$V_D^{\text{теор}}$
Расхождения, %	$\frac{\theta_A^{\text{теор}} - \theta_A^{\text{оп}}}{\theta_A^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{\theta_S^{\text{теор}} - \theta_S^{\text{оп}}}{\theta_S^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{(V_S^{\text{теор}} - V_S^{\text{оп}})}{V_S^{\text{теор}}} \cdot 100$	$\frac{(V_D^{\text{теор}} - V_D^{\text{оп}})}{V_D^{\text{теор}}} \cdot 100$

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.
16. Оформить отчет о лабораторной работе. Пример оформления отчета приведен в приложении.

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена необходимость требований по жесткости к изгибаемым элементам?
2. Какой метод использован в лабораторной работе для определения прогибов и углов поворота сечений балки?
3. Почему метод начальных параметров является приближенным методом расчета деформаций балок?
4. Какая цель ставится в лабораторной работе?
5. Какие требования предъявляются при испытании балки?
6. На какой установке проводится испытание на изгиб?
7. Что является объектом испытания на изгиб?
8. Как опирается балка?
9. Для чего служит спаренная швеллерная балка?
10. Для чего измеряются высота сечения двутавра и средняя толщина полки?
11. Какие измерительные инструменты используются при проведении лабораторной работы?
12. Какие приборы используются для определения прогибов и углов поворота сечений балки?
13. Чему равна цена деления стрелочного индикатора?
14. Как заполняется таблица опытных данных?
15. Как строятся графики зависимостей прогибов балки от нагрузки?
16. Какой вывод можно сделать по результатам анализа зависимости прогибов балки от нагрузки?
17. Как показания стрелочных тензометров, предназначенных для измерения линейных смещений, используются для определения углов поворота поперечных сечений балки?
18. Как вычисляются перемещения точек балки только за счет деформации опор?
19. По каким выражениям определяются опытные перемещения точек балки?

20. Как вычисляются опытные прогибы балки, то есть перемещения, вызванные только искривлением балки?
21. Как определяются реакции опор опытной балки?
22. Как составляются универсальное уравнение упругой оси балки и уравнение углов поворота ее поперечных сечений по методу начальных параметров?
23. По каким условиям определяются начальные параметры?
24. Как оценивается достоверность теории расчета тонких балок?
25. Какие выводы можно сделать по результатам исследований, проведенных в лабораторной работе?

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по охране труда : разработана на кафедре сопротивления материалов и теории упругости. – 2010.
2. Александров, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин ; под ред. А. В. Александрова. – М. : Высш. шк., 1995. – 560 с.
3. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов [и др.] ; под общ. ред. А. Ф. Смирнова. – М. : Высш. шк., 1975. – 480 с.
4. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1986. – 560 с.
5. Сопротивление материалов : лабораторный практикум / М. К. Балькин [и др.]. – Минск : БГПА, 1999. – 158 с.
6. Справочник по сопротивлению материалов / Е. Ф. Винокуров [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 464 с.
7. Рубашкин, А.П. Лабораторные работы по сопротивлению материалов : учебное пособие / А. П. Рубашкин. – Изд. 3-е. – М. : Высш. шк., 1971. – 240 с.
8. Металловедение и технология металлов / под ред. Ю. П. Солнцева. – М. : Металлургия, 1988. – 512 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Образцы оформления отчетов о лабораторных работах

Отчет о лабораторной работе № 1

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы

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

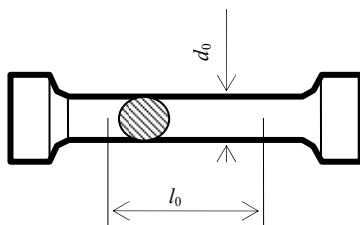
Исходные данные

Требования к испытанию. В соответствии со стандартом нагружение выполнять со скоростью 1 мм/мин, не допускать перекосов и толчков, соблюдать технику безопасности.

Испытательная машина: разрывная машина механического привода Р-5.

Измерительные приборы и инструменты: штангенциркуль и линейка.

Схема образца до испытания и результаты измерения – короткий пятикратный образец.



$$l_r = 41,0 \text{ мм}; \quad l_0 = 30 \text{ мм}, \quad d_0 = 6 \text{ мм}, \quad l_0/d_0 = 5,$$

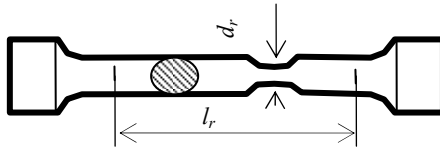
$$d_{r1} = 2,5 \text{ мм}; \quad d_{r2} = 2,7 \text{ мм};$$

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} = 28,26 \text{ мм}^2;$$

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

Опытные данные

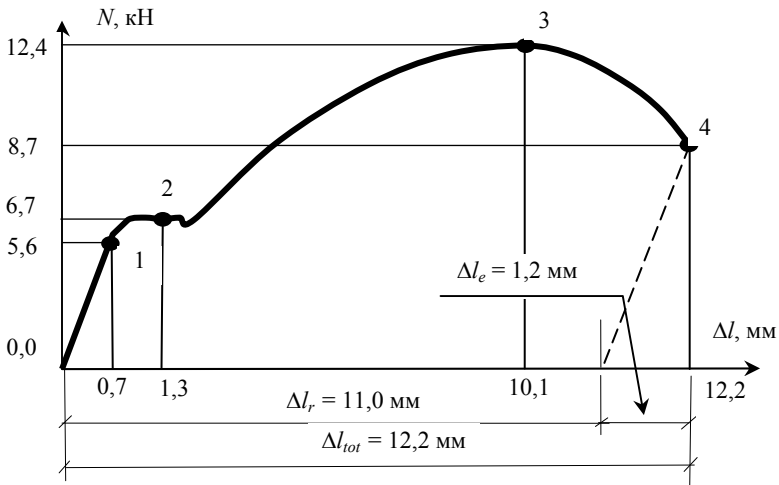
Схема образца после испытания



Усилия и деформации в характерных точках диаграммы растяжения

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

Машинная диаграмма растяжения



Результаты испытания

Деформации в характерных точках диаграммы напряжений

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_{pr}}{l_0} = \frac{0,7}{30} = 0,023;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_y}{l_0} = \frac{1,3}{30} = 0,043;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta l_u}{l_0} = \frac{10,1}{30} = 0,337;$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{12,2}{30} = 0,407.$$

Характеристики прочности:

предел пропорциональности

$$\sigma_{pr} = \frac{N_{pr}}{A_0} = \frac{5,6 \cdot 10^3}{28,26 \cdot 10^{-6}} = 198 \text{ МПа};$$

предел текучести

$$\sigma_y = \frac{N_y}{A_0} = \frac{6,7 \cdot 10^3}{28,26 \cdot 10^{-6}} = 237 \text{ МПа};$$

предел прочности

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0} = \frac{12,4 \cdot 10^3}{28,26 \cdot 10^{-6}} = 439 \text{ МПа}.$$

Характеристики пластичности:

относительное остаточное удлинение

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

относительное остаточное сужение

$$\chi_r = \frac{A_0 - A_r}{A_0} \cdot 100 = \frac{28,26 - 5,31}{28,26} \cdot 100 = 81 \%.$$

Удлинение к моменту разрыва:

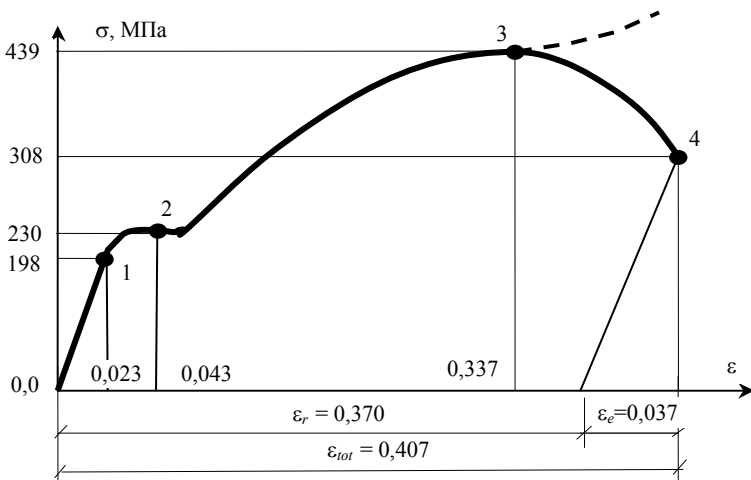
полное	$\Delta l_{tot} = 12,2 \text{ мм};$
упругое	$\Delta l_e = 1,2 \text{ мм};$
остаточное	$\Delta l_r = 11,0 \text{ мм}.$

Напряжения в момент разрыва:

условное $\sigma_0 = \frac{N_0}{A_0} = \frac{8,7 \cdot 10^3}{28,26 \cdot 10^{-6}} = 308 \text{ МПа};$

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

Диаграмма напряжений



Определение марки стали

Марка стали (*определена по нижнему нормативному пределу*)

Ст. 3 кп, $\sigma_{yn} = 235$ МПа.

Нормативное сопротивление $R_n = \sigma_{yn} = 235$ МПа.

Расчетное сопротивление $R_y = R_n/\gamma_n = 235/1,05 = 224$ МПа.

Выводы

Определены механические характеристики, марка стали – Ст. 3 кп, нормативное сопротивление $R_n = 235$ МПа, расчетное сопротивление $R_y = 224$ МПа.

Работу выполнил

Преподаватель

Дата _____

Отчет о лабораторной работе № 2

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Цель работы

1. Изучение опытных зависимостей 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 еще и расчетное сопротивление.

Исходные данные

Требования к испытанию: в соответствии со стандартом нагружение выполнять со скоростью 1 мм/мин, не допускать перекосов и толчков, соблюдать технику безопасности.

Испытательная машина: разрывная машина гидравлического привода Р-50.

Измерительные приборы и инструменты: штангенциркуль и линейка.

Схема образцов до испытания

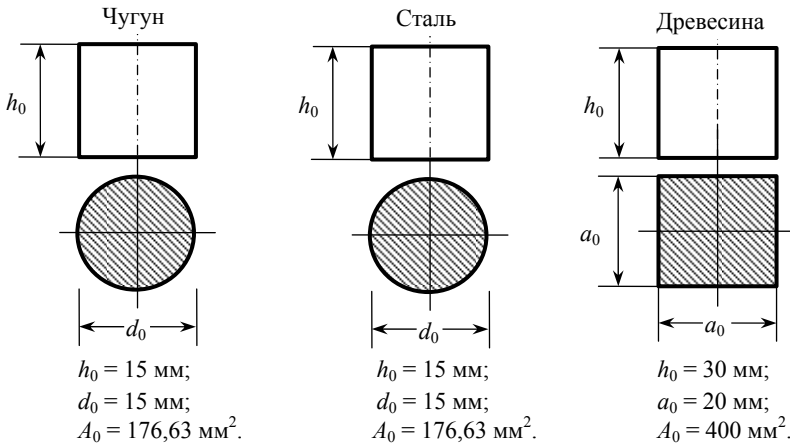
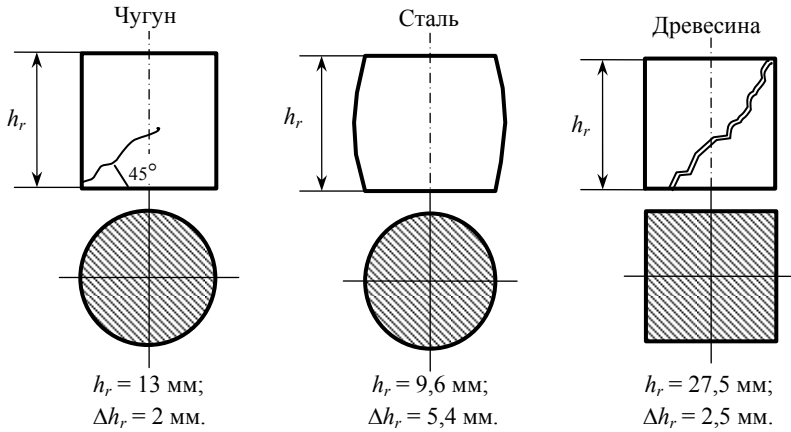


Схема образца после испытания



Усилия предела прочности:

для чугунного образца

для образца из древесины

Усилия предела текучести стального образца

Максимальное усилие испытания для стали

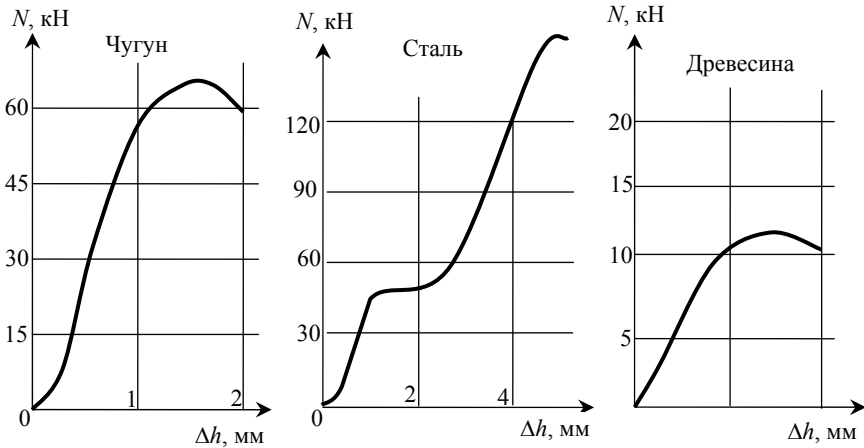
$$N_u = 79,2 \text{ кН};$$

$$N_u = 11,6 \text{ кН}.$$

$$N_y = 43,2 \text{ кН}.$$

$$N_{\max} = 142,4 \text{ кН}.$$

Диаграммы сжатия образцов



Результаты испытания

Характеристики прочности и пластичности

Для образца из чугуна предел прочности

$$\sigma_u = \frac{N_u}{A_0} = \frac{79,2 \cdot 10^3}{176,63} = 448 \text{ МПа};$$

относительное остаточное укорочение

$$\varepsilon_r = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \cdot 100 = \frac{15,0 - 13,0}{15,0} \cdot 100 = 13 \%$$

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

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

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 в опыте

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

относительное остаточное укорочение при максимальной нагрузке

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

Расчетные сопротивления:

для образца из чугуна

$$R_C = \frac{\sigma_u}{\gamma_m} = \frac{448}{2,5} = 179 \text{ МПа};$$

для образца из древесины

$$R_C = \frac{\sigma_u}{\gamma_m} = \frac{29}{2,5} = 11,6 \text{ МПа}.$$

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 о 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.

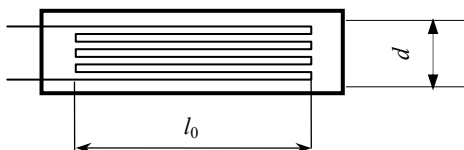
Исходные данные

Требования к испытанию: максимальная сила растяжения не должна вызывать пластических деформаций стали. Нагружение выполнять равными ступенями.

Испытательная машина: разрывная машина гидравлического привода Р-50 (или механического привода Р-5).

Измерительные приборы и инструменты: штангенциркуль, стальная линейка и измеритель деформаций ИДЦ-1.

Схема датчика (тензорезистора)



$$l_0 = 3 \text{ см};$$

$$d = 0,5 \text{ см};$$

$$K = 2,07.$$

Схема образца с датчиками

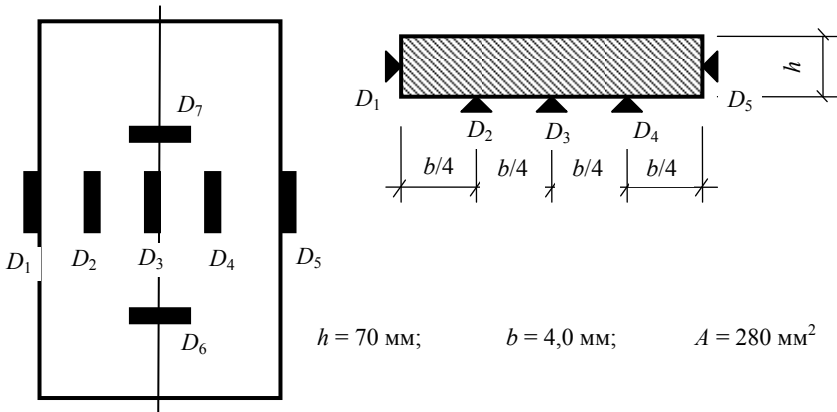
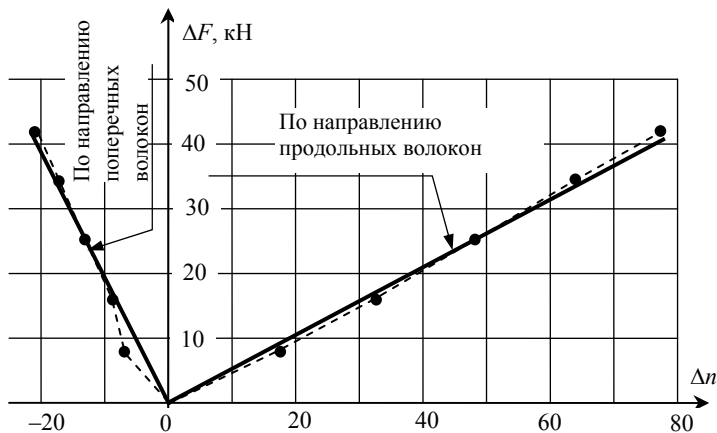


Таблица опытных данных

Датчик		Д ₁		Д ₂		Д ₃		Д ₄		Д ₅		Д ₆		Д ₇	
$F, \text{ кН}$	ΔF	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn
0		675		687		630		618		636		649		640	
8,4	8,4	19		18		18		19		18		-6		-7	
8,4	8,4	694		705		648		637		654		643		633	
8,4	8,4	15		20		15		13		15		-4		-2	
16,8	8,4	709		725		663		650		669		639		631	
8,4	8,4	16		10		15		15		15		-3		-4	
25,2	8,4	725		735		678		665		684		636		627	
8,4	8,4	15		15		15		15		15		-4		-4	
33,6	8,4	740		750		693		680		699		632		623	
8,4	8,4	14		15		15		16		15		-4		-4	
42,0	8,4	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



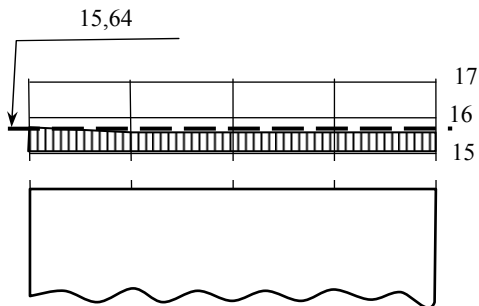
Среднее приращение отсчетов (по D_1-D_5)

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

Среднее приращение отсчетов (по D_6-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 – 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 – D_7)

$$\Delta\varepsilon'_m = \frac{2 \cdot \Delta n'_m \cdot \alpha}{K} = \frac{2 \cdot (-4,2 \cdot 1 \cdot 10^{-5})}{2,07} = -0,04110^{-3}.$$

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 о лабораторной работе № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 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

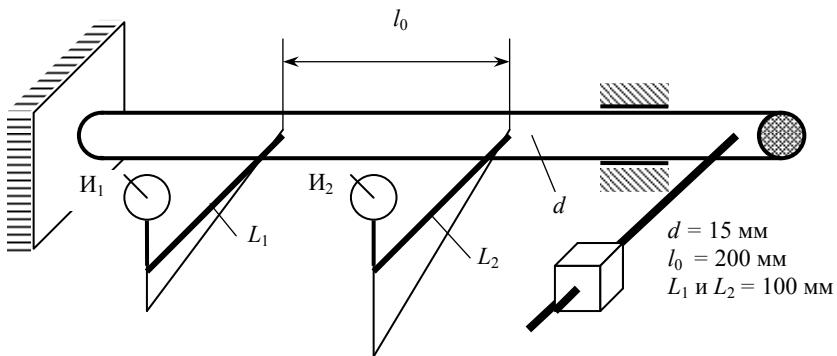
Требования к испытанию: *плавное нагружение стержня, точность положения измерительных приборов.*

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



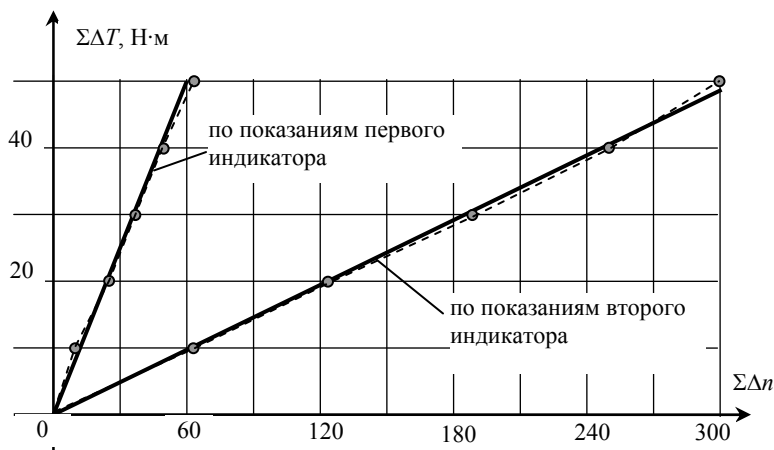
Геометрические характеристики поперечного сечения

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

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

Таблица опытных данных

Нагрузка, Нм		Индикаторы			
		И ₁		И ₂	
<i>T</i>	ΔT	<i>n</i>	Δn	<i>n</i>	Δn
20		0		0	
	10		11		63
30		11		63	
	10		14		62
40		25		125	
	10		12		63
50		37		188	
	10		13		61
60		50		249	
	10		13		64
70		63		313	
Среднее	$\Delta T_m = 10$	$\Delta n_{1m} = 12,6$		$\Delta n_{2m} = 62,6$	



Результаты испытания

Максимальное касательное напряжение в образце

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_P} = \frac{70,0}{0,662 \cdot 10^{-6}} = 106 \text{ МПа} < 0,55 \cdot \sigma_{pr} = 0,55 \cdot 200 = 110 \text{ МПа.}$$

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

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

Из закона Гука

$$\Delta\theta = \frac{\Delta T \cdot l}{G \cdot I_p}$$

Вычисляется значение модуля сдвига по опытным данным

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

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

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

Выводы

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 о лабораторной работе № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

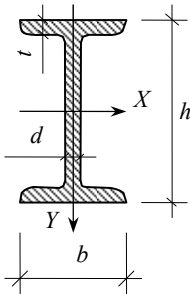
1. По результатам опыта установить закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки.
2. Подтвердить справедливость закона Гука и гипотезу плоских сечений при плоском изгибе тонких балок.

Исходные данные

Требования к испытанию: отсутствие перекосов, плавность нагружения.

Опытная установка: двутавровая балка, опирающаяся на две шарнирные опоры, имеет консоль, нагружается гидравлическим домкратом, закрепленным на составной швеллерной балке.

Объект исследования (изобразить поперечное сечение балки и привести данные).



Двутавр № 16

$$h = 160 \text{ мм};$$

$$d = 5 \text{ мм};$$

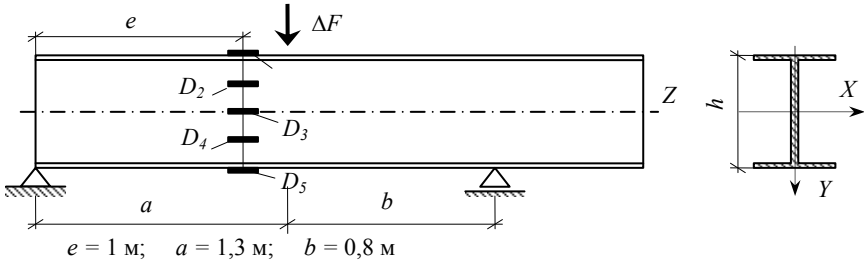
$$I_x = 873 \text{ см}^4;$$

$$W_x = 109 \text{ см}^3;$$

$$E = 206 \text{ ГПа}.$$

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

Схема опытной балки

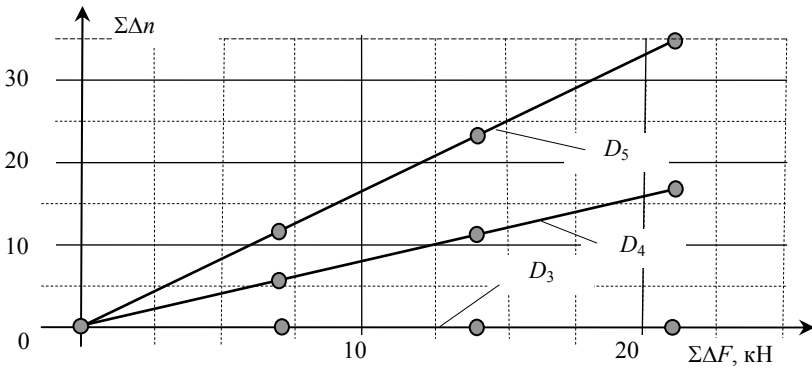


Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка, кН		Д ₁		Д ₂		Д ₃		Д ₄		Д ₅	
F	ΔF	n ₁	Δn ₁	n ₂	Δn ₂	n ₃	Δn ₃	n ₄	Δn ₄	n ₅	Δn ₅
10,0	6,9	945	-11	1070	-6	906	0	1034	5	1113	11
16,9		934		1064		906		1039		1124	
23,8	6,9	922	-12	1058	-6	906	0	1045	6	1136	12
30,7	6,9	910	-12	1053	-5	906	0	1051	6	1148	12
ΔF _m = 6,9		Δn _{m1} = -11,7		Δn _{m2} = -5,7		Δn _{m3} = 0		Δn _{m4} = 5,7		Δn _{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

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

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

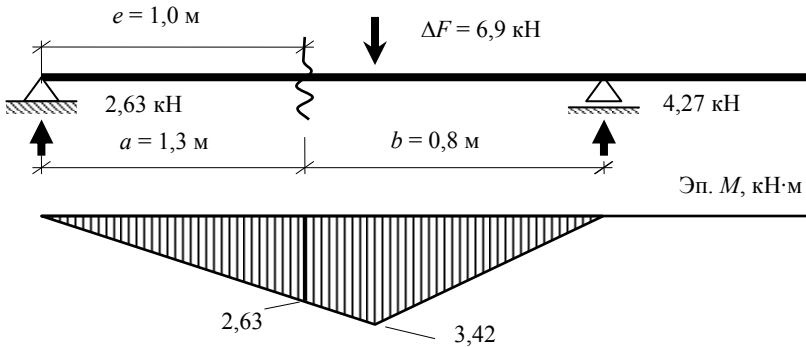
$$\sigma_{m3} = E\varepsilon_{m3} = 206 \cdot 10^9 \cdot 0,0 = 0,0 \text{ МПа};$$

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

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

Теоретический расчет

Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов



Нормальные напряжения в исследуемых точках сечения балки

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

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

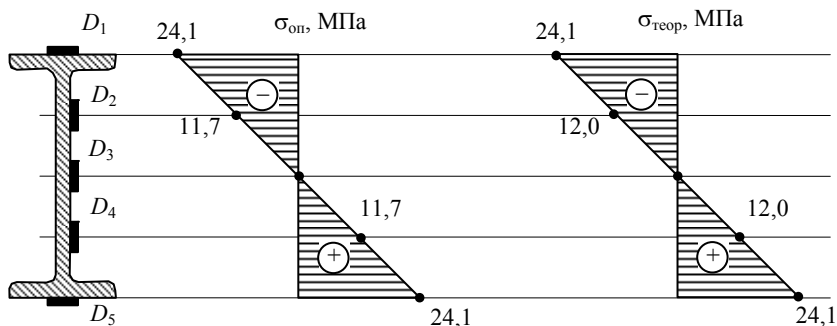
$$\sigma_3 = \frac{M_X}{I_X} y_3 = \frac{2,63 \cdot 10^3}{873 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0 = 0,0 \text{ МПа};$$

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

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

Сравнение результатов

Эпюры нормальных напряжений



Сравнения результатов опыта и теоретического расчета

Напряжения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_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

Выводы

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 о лабораторной работе № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

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

Исходные данные

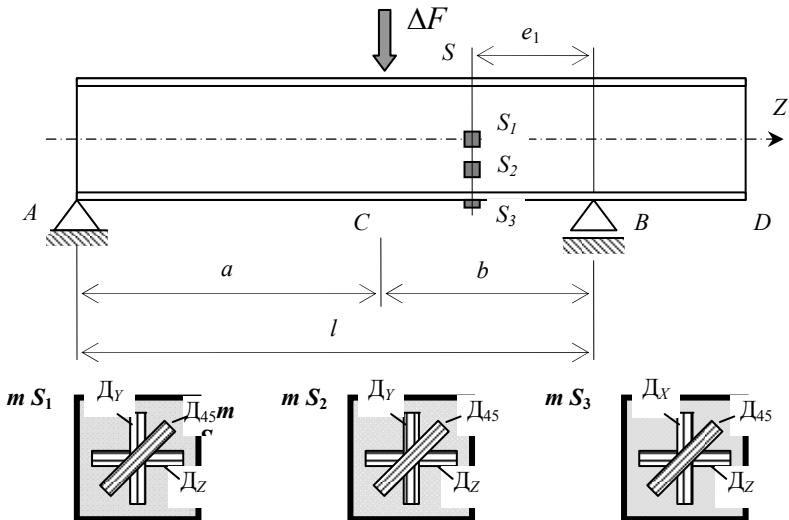
Требования к испытанию: отсутствие перекосов нагрузки и установки приборов.

Опытная установка: балочный испытатель.

Объект исследования: стальной прокатный двутавр № 16;
 $h = 160$ мм; $d = 5$ мм; $I_x = 873$ см⁴; $W_x = 109$ см³; $E = 206$ ГПа.

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

Схема опытной балки

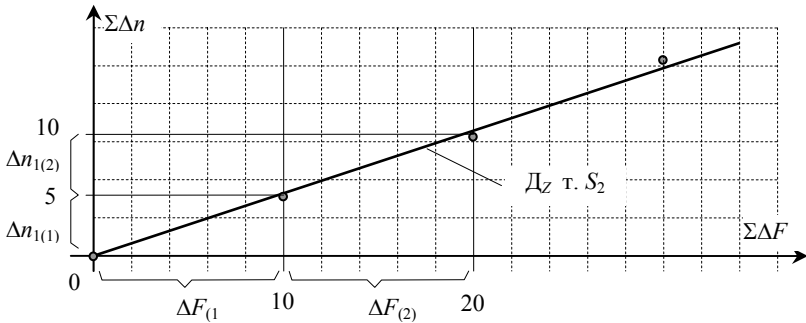


Опытные данные

Таблица опытных данных

Точки		S_1						S_2					
Датчики		D_Z		D_Y		D_{45}		D_Z		D_Y		D_{45}	
F , кН	ΔF , кН	n_1	Δn_1	n_2	Δn_2	n_3	Δn_3	n_4	Δn_4	n_5	Δn_5	n_6	Δn_6
10	10	1001		965		1013		984		1001		965	
			0		1		4		5		1		9
20		1001		966		1017		989		1002		974	
			-1		-1		6		5		0		9
30		1000		965		1023		994		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
$\varepsilon_y(\varepsilon_{1m}) \cdot 10^5$	0	4,88	$\varepsilon_{\min} \cdot 10^5$	-4,88	-4,36
$\varepsilon_z(\varepsilon_{2m}) \cdot 10^5$	0	0	σ_{\max} , МПа	7,73	17,94
$\varepsilon_{45}(\varepsilon_{3m}) \cdot 10^5$	4,88	8,78	σ_{\min} , МПа	-7,73	-3,59
$\gamma_{yz} \cdot 10^5$	-9,76	1,27	τ_{\max} , МПа	7,73	10,77
$\varepsilon_{\max} \cdot 10^5$	4,88	17,94	α_0 , град.	45	21,1

Для определения опытных деформаций, напряжений и угла поворота главных площадок использованы формулы (6.1)–(6.6).

Теоретический расчет

Реакции опор балки

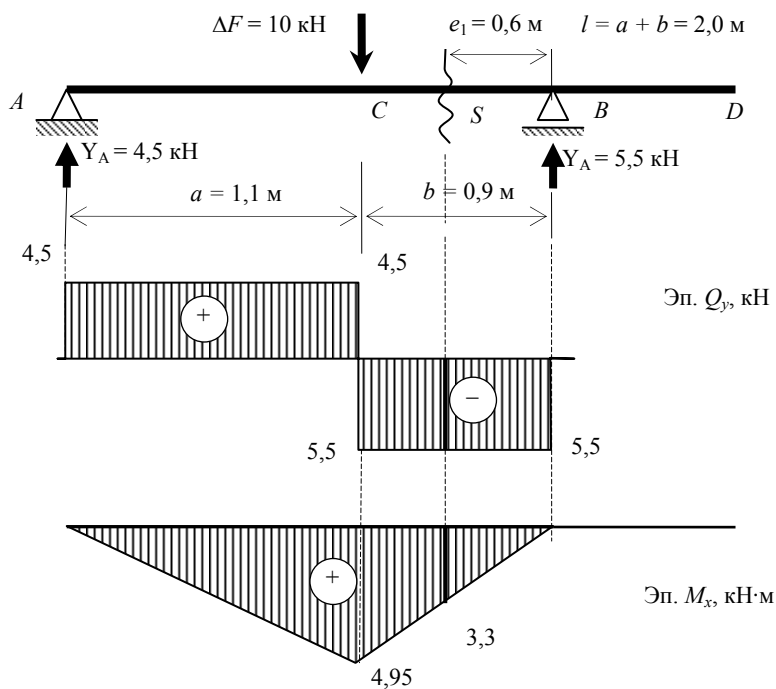
$$Y_A = \Delta F \cdot \frac{b}{a+b} = 10 \cdot \frac{0,9}{1,1+0,9} = 4,5 \text{ кН};$$

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

Изгибающий момент и поперечная сила в расчетном сечении S

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

Расчетная схема балки и эпюры внутренних сил



Результаты теоретического расчета

Для вычисления теоретических значений напряжений и угла поворота главных площадок использованы формулы (6.7)–(6.12).

Результаты теоретического расчета приведены в таблице.

Величина	Точка S_1	Точка S_2	Величина	Точка S_1	Точка S_2
σ_z , МПа	0	15,12	σ_{\max} , МПа	7,85	18,10
S_X° , МПа	62,30	58,30	σ_{\min} , МПа	-7,85	-2,98
τ_{yz} , МПа	7,85	7,35	α_0 , град	45	22,09
τ_{\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			
	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	τ_{\max} , МПа	α_0 , град	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	τ_{\max} , МПа	α_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 деформация подчиняется 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

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, равноступенчатая. 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

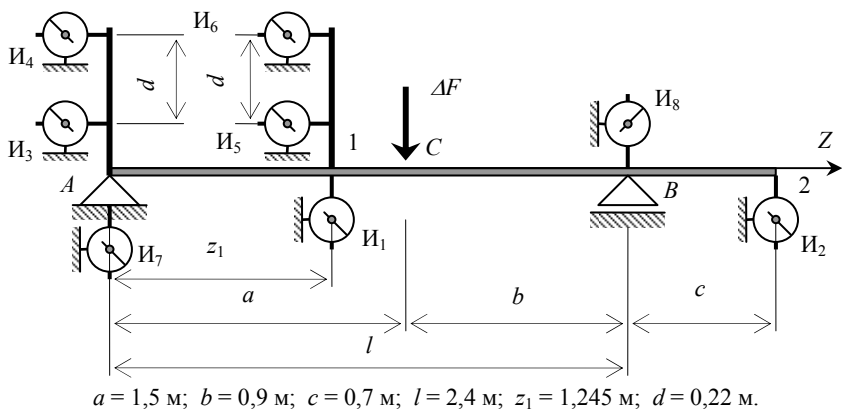


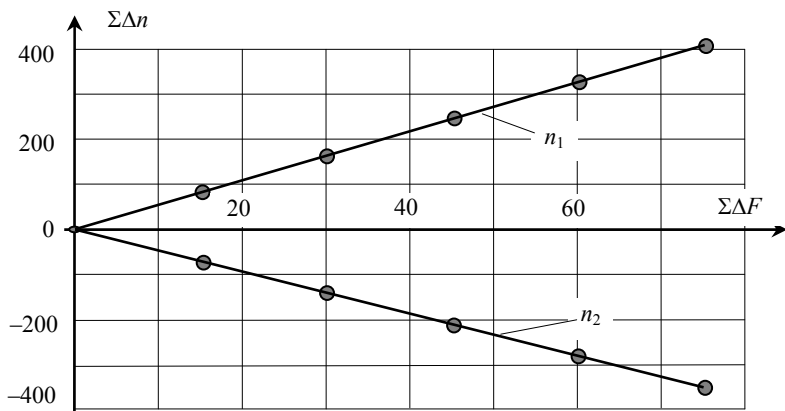
Таблица опытных данных

Индикаторы		И ₁		И ₂		И ₃		И ₄	
F , кН	ΔF , кН	n_1	Δn_1	n_2	Δn_2	n_3	Δn_3	n_4	Δn_4
0		0		0		0		0	
15	15	86	86	-73	-73	24	24	52	52
15	15	79	79	-68	-68	20	20	47	47
30	15	165	165	-141	-141	44	44	99	99
45	15	82	82	-70	-70	21	21	47	47
45	15	247	247	-211	-211	65	65	146	146
60	15	78	78	-67	-67	21	21	47	47
60	15	325	325	-278	-278	86	86	193	193
75	15	83	83	-65	-65	22	22	47	47
75		408	408	-343	-343	108	108	240	240
Среднее	$\Delta F_m = 15$	$\Delta n_{1m} = 81,6$	$\Delta n_{1m} = 81,6$	$\Delta n_{2m} = -68,6$	$\Delta n_{2m} = -68,6$	$\Delta n_{3m} = 21,6$	$\Delta n_{3m} = 21,6$	$\Delta n_{4m} = 48,0$	$\Delta n_{4m} = 48,0$

Продолжение таблицы опытных данных

Индикаторы		И ₅		И ₆		И ₇		И ₈	
F, кН	ΔF, кН	n ₅	Δn ₅	n ₆	Δn ₆	n ₇	Δn ₇	n ₈	Δn 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	ΔF _m = 15	Δn _{5m} = 13,4		Δn _{6m} = -13,4		Δn _{7m} = 1,6		Δn _{8m} = 4,4	

График деформации



Результаты испытания

Угол поворота опорного сечения А (при z = 0)

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

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

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= \left(\Delta n_{7m} + \frac{\Delta n_{8m} - \Delta n_{7m}}{l} \cdot z \right) \cdot \alpha = \\ &= \left(1,6 + \frac{4,4 - 1,6}{2,4} \cdot 1,245 \right) \cdot 10^{-5} = 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \Delta V_2 &= \left(\Delta n_{7m} + \frac{\Delta n_{8m} - \Delta n_{7m}}{l} \cdot z \right) \cdot \alpha = \\ &= \left(1,6 + \frac{4,4 - 1,6}{2,4} \cdot 3,1 \right) \cdot 10^{-5} = 5,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \end{aligned}$$

Опытные перемещения (совместно с осадкой опор):

1) сечения 1 $V_1 = \Delta n_{1m} \cdot \alpha = 81,6 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 81,6 \cdot 10^{-5}$ м;

2) сечения 2 $V_2 = \Delta n_{2m} \cdot \alpha = 68,6 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 68,6 \cdot 10^{-5}$ м.

Опытные прогибы (без осадки опор):

1) сечения 1 $V_1^* = V_1 - \Delta V_1 = 81,6 \cdot 10^{-5} - 3,05 \cdot 10^{-5} = 78,55 \cdot 10^{-5}$ м;

2) сечения 2 $V_2^* = V_2 + \Delta V_2 = 68,6 \cdot 10^{-5} + 5,22 \cdot 10^{-5} = 73,82 \cdot 10^{-5}$ м.

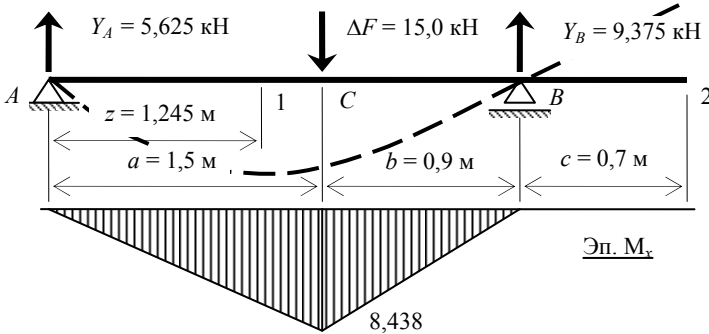
Большой абсолютный прогиб в точке 1 $V_{\max}^* = 78,55 \cdot 10^{-5}$ м.

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)

$$EIV_A = EIV_0 + EI\theta_0 \cdot 0 = 0; \quad EIV_0 = 0; \quad v_0 = 0;$$

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

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

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

$$EIV_1 = 0 - 4,64 \cdot 10^3 \cdot 1,245 + \frac{5,625 \cdot 10^3 \cdot (1,245 - 0)^3}{6} = -3,97 \cdot 10^3;$$

$$V_1 = -0,76 \text{ мм};$$

$$EI\theta_1 = -4,64 \cdot 10^3 + \frac{5,625 \cdot 10^3 \cdot (1,245 - 0)^2}{2} = -0,28 \cdot 10^3;$$

$$\theta_1 = -0,053 \cdot 10^{-3} = -0,003^\circ;$$

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

$$EIV_D = 0 - 4,64 \cdot 10^3 \cdot 3,1 + \frac{5,625 \cdot 10^3 \cdot (3,1 - 0)^3}{6} - \frac{15 \cdot 10^3 \cdot (3,1 - 1,5)^3}{6} + \\ + \frac{9,375 \cdot 10^3 \cdot (3,1 - 2,4)^3}{6} = 3,839 \cdot 10^3; \quad V_D = 0,73 \text{ мм};$$

сечение A ($z = 0$)

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

Сравнение результатов

Значения	θ_A°	θ_S°	V_1 , мм	V_2 , 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 электрического принципа действия для измерения деформаций.....	10
Контрольные вопросы.....	18
2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	20
2.1. Чугун.....	20
2.2. Металлургия стали.....	21
2.3. Бетон.....	22
2.4. Цемент.....	23
2.5. Алюминий.....	24
2.6. Основные механические характеристики некоторых материалов.....	26
Контрольные вопросы.....	26
3. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ.....	27
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ.....	28
4.1. Механические характеристики прочности.....	28
4.2. Механические характеристики пластичности.....	29
Контрольные вопросы к разделам 3 и 4.....	30
Часть II. Лабораторный практикум.....	31
Лабораторная работа № 1 ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ.....	31
Лабораторная работа № 2 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ.....	45

Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	53
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СДВИГА.....	62
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ.....	70
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ.....	80
Лабораторная работа № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ.....	92
ЛИТЕРАТУРА	102
ПРИЛОЖЕНИЕ. Образцы оформления отчетов о лабораторных работах.....	103
Отчет о лабораторной работе № 1. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ.....	104
Отчет о лабораторной работе № 2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ.....	109
Отчет о лабораторной работе № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	113
Отчет о лабораторной работе № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА.....	118
Отчет о лабораторной работе № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ.....	122
Отчет о лабораторной работе № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ.....	127
Отчет о лабораторной работе № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ.....	131

Учебное издание

ВЕРБИЦКАЯ Ольга Леонидовна
ЗИНЕВИЧ Сергей Иванович
ШЕВЧУК Леонид Иванович

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Пособие по выполнению лабораторных работ
для студентов строительных специальностей

В 2 частях

Часть 1

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 10.03.2014. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 8,08. Уч.-изд. л. 6,32. Тираж 150. Заказ 1128.

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.