



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический
университет

Кафедра «Мосты и тоннели»

В.А. Ходяков

ИСПЫТАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей
1-70 03 01 «Автомобильные дороги» и
1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены»

Минск
БНТУ
2019

Р е ц е н з е н т:
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета
В.А. Гречухин

Ходяков В. А.

Испытание строительных конструкций: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» и 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» / В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2019. – 62 с.

В пособии приведены методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Строительные конструкции» для студентов специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» и по дисциплине «Строительные конструкции транспортных сооружений» для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» Факультета транспортных коммуникаций.

© Ходяков Вячеслав Андреевич, 2019
© Белорусский национальный технический университет, 2019

От автора:

Данное учебно-методическое пособие написано на основе практикума по лабораторным работам 2011 года за авторством Пастушкова Г.П., Пастушкова В.Г. и Нестеренко В.В. Часть лабораторных работ были изложены в более доступной форме, другая часть, наоборот, проработана глубже и дополнена. Все лабораторные работы составлены с учётом актуальной материально-технической базы Факультета транспортных коммуникаций и кафедры «Мосты и тоннели». Также были рассмотрены учебно-методические пособия других вузов СНГ по данной дисциплине.

Особое внимание уделено систематизации материала для облегчения процесса его усвоения студентами. Текст, выделенный в пособии курсивом, носит информационный характер и не обязателен к конспектированию при выполнении лабораторных работ. Остальной текст, схемы и рисунки рекомендуется конспектировать в процессе выполнения лабораторной работы. Фотографии установок и средств измерений не обязательны для конспектирования.

Лабораторные работы №№ 1, 2, 3, 5, 6, 7 и 8 рекомендуются для выполнения студентам специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги».

Лабораторные работы №№ 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 рекомендуются для выполнения студентам специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены».

Лабораторную работу № 7 допускается выполнять в течение двух лабораторных занятий.

Материал, изложенный в лабораторных работах №№ 1 и 2, рекомендуется к изучению в рамках практических занятий по дисциплине «Метрология, стандартизация и управление качеством» для студентов специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены».

Все материалы пособия перед публикацией апробированы на лабораторных занятиях студентами. В связи с чем, автор выражает благодарность за помощь в оптимизации изложенного материала, помощь в поиске ошибок и обратную связь студентам третьего курса групп 114 04 117, 114 04 217, 114 03 117, 114 03 217, 114 03 317, и 114 03 417.

Автор выражает благодарность:

Заведующей кафедры «Математические методы в строительстве» Капусто Анне Владимировне за многочисленные консультации при написании лабораторных работ касающиеся статистической обработки экспериментальных данных.

Заведующему кафедры «Мосты и тоннели» Гречухину Владимиру Александровичу за консультации по вопросам написания и издания учебно-методического пособия.

Инженеру кафедры «Мосты и тоннели» Савиной Елене Николаевне за помощь в оформлении учебно-методического пособия.

С благодарностью и уважением к авторам более ранних учебно-методических пособий, моим учителям, сотрудникам кафедры «Мосты и тоннели» БНТУ.

В дополнение к текущему учебно-методическому пособию опубликовано дополнение «Испытание строительных конструкций» Варианты заданий и примеры расчёта. Ищите на Репозитории БНТУ.

Дополнения и пожелания по совершенствованию и развитию изложенного курса лабораторных работ читатели могут направлять на электронную почту автора: xva609@gmail.com. Благодарю за обратную связь!

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 Конструктивные и технические особенности измерительных средств	5
Лабораторная работа № 2 Оценка надежности и достоверности экспериментальных данных	12
Лабораторная работа № 3 Испытание стальной балки на изгиб с учётом развития пластических деформаций	18
Лабораторная работа № 4 Определение нормативных и расчётных механических характеристик древесины	25
Лабораторная работа № 5 Испытание деревянной балки на изгиб.....	31
Лабораторная работа № 6 Определение механических характеристик арматурных сталей. Классы арматурных сталей	37
Лабораторная работа № 7 Определение нормативных и расчётных механических характеристик бетона.....	44
Лабораторная работа № 8 Испытание железобетонной балки на изгиб с разрушением по сечению нормальному к продольной оси.....	51
Лабораторная работа № 9 Испытание железобетонной балки на изгиб с разрушением по сечению наклонному к продольной оси	59

Лабораторная работа № 1

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципами действия традиционных измерительных средств, применяемых при лабораторных испытаниях строительных конструкций.

Задачи работы:

- ознакомиться с основными характеристиками применяемых при испытаниях конструкций измерительных средств;
- ознакомиться с принципиальными схемами и принципом действия применяемых измерительных средств;
- ознакомиться с правилами применения измерительных средств.

В процессе лабораторных испытаний строительных конструкций применяется ряд приборов, которые предназначены для измерения определённых величин, контролируемых при испытании (таблица 1).

Таблица 1 – Средства измерения и их основные характеристики

Средство измерения	Назначение	Цена деления (точность измерения)	Пределы измерения	База измерения
Тензомер Гугенбергера	измерение относительных линейных деформаций и определение механических напряжений в материале конструкции	0,001 мм	0,05 мм	20 мм, с удлинителем базы до 500 мм
Тензорезистор (Электрический тензомер)		0,01 мм/м*	1 мм*	5 – 50 мм*
Индикаторы	измерение линейных перемещений и деформаций	0,001..0,01 мм**	1..30 мм**	зависит от способа установки
Прогибомер Максимова	измерение прогибов	0,1 мм	не имеет	не имеет
Прогибомер Аистова		0,01 мм		
Клинометр Аистова	измерение угла поворота	6"	6 ⁰	не имеет

* – зависит от модели тензорезистора и преобразователя;

** – в зависимости от модели.

База измерения – начальное расстояние, изменение длины которого фиксируется при определении относительных линейных деформаций.

Ниже приведены конструктивные схемы и фотографии средств измерения.

Тензомер Гугенбергера

Жесткая станина 1 тензомера с одной стороны имеет острую неподвижную ножку, а с другой треугольный вырез для опирания призмы, являющейся малым плечом рычага первого рода 4. Верхняя часть этого рычага (плечо А) шарнирно, при помощи коромысла 2, соединена с другим рычагом (стрелкой) второго рода 3, прикрепленным шарнирно к станине 1. Расстояние между неподвижной ножкой и подвижной призмой называется базой измерения $S = 20$ мм.

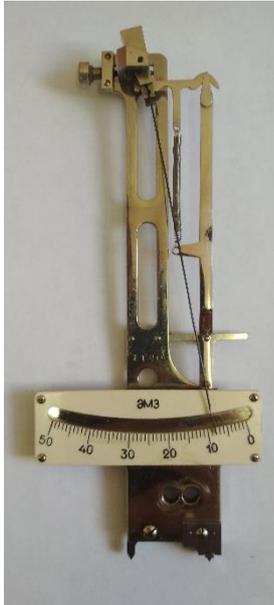


Рисунок 1 – Общий вид тензомера Гугенбергера

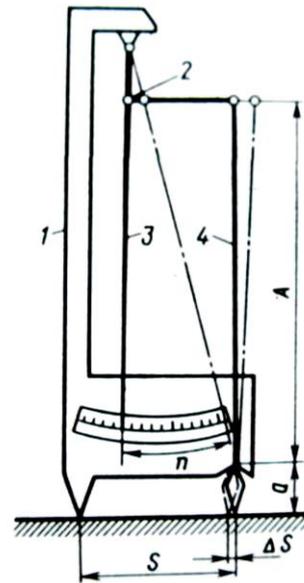


Рисунок 2 – Схема тензомера Гугенбергера

Относительная деформация материала определяется как отношение ΔS к S . А напряжения, возникающие в материале, могут быть получены умножением значения относительных деформаций на модуль упругости материала E .

Тензорезистор (Электрический тензомер)

Тензорезистор является датчиком, он представляет собой полоску бумаги или пластика с вклеенной в неё тонкой металлической проволокой диаметром до 0,05 мм. Тензорезистор одноразовый, он плотно приклеивается на поверхность исследуемой конструкции, а электрические выводы при помощи проводов специальным образом соединяются с измерительным прибором, например, Измерителем деформации цифровым (ИДЦ).

Непосредственно измеряемым параметром тензорезистора является его электрическое сопротивление (сопротивление проволоки). При растяжении или сжатии конструкции, тензорезистор и проволока внутри датчика так же растягиваются или сжимаются.

При растяжении проволоки, её длина увеличивается, а поперечное сечение уменьшается. Из курса физики нам известно, что чем больше длина проводника и меньше его диаметр, тем выше его сопротивление. Таким образом, существует пропорциональная зависимость между электрическим сопротивлением тензорезистора и относительной деформацией конструкции, на которую он приклеен.

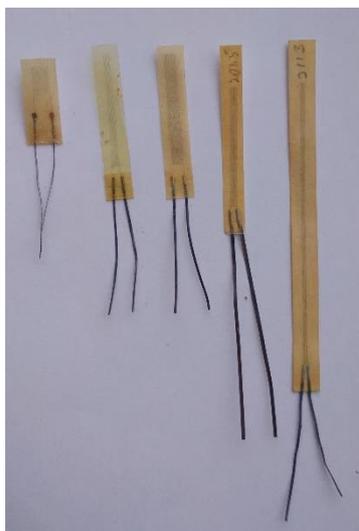


Рисунок 3 – Общий вид проволочных петлевых тензорезисторов

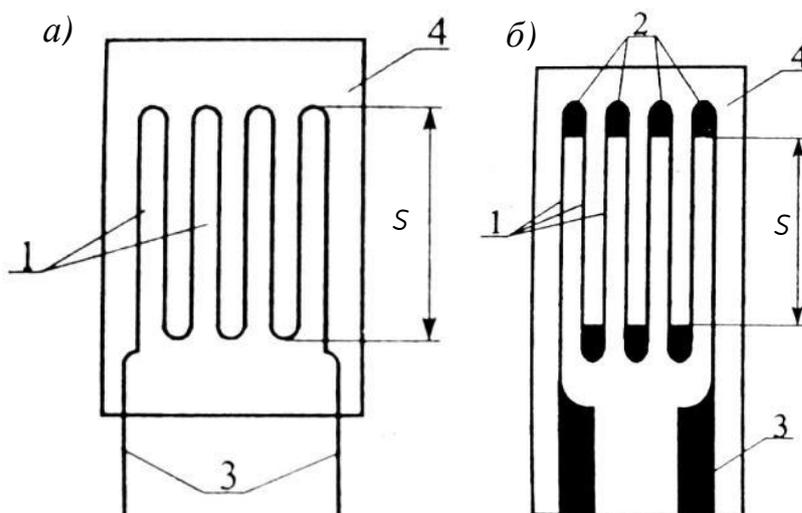


Рисунок 4 – Схема проволочного петлевого (а) и фольгового (б) тензорезисторов: 1 – тензочувствительные элементы; 2 – низкоомные перемычки; 3 – выводные контакты; 4 – подложка

Тензорезисторы выбирают по трём основным характеристикам:
сопротивлению R ;
базе измерений S ;
коэффициенту тензочувствительности K .

Индикаторы

Индикатор является самым универсальным из рассматриваемых в этой работе приборов. Он может быть использован как тензометр, как прогибомер или как клинометр, в зависимости от способа установки.

В корпусе 1 свободно перемещается в продольном направлении шток 2. В средней части штока имеется зубчатая нарезка, входящая в зацепление с шестеренкой 3, жестко соединенной с другой шестеренкой 4. Последняя входит в зацепление с шестеренкой 6, закрепленной на одной оси с большой стрелкой 5. Вращение с шестеренки 6 передается на шестеренку 7 и на малую стрелку 8.



Рисунок 5 – Индикатор часового типа (ИЧ) и его внутренне устройство со снятой задней крышкой

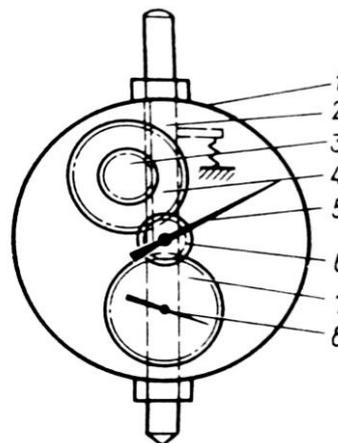


Рисунок 6 – Схема Многооборотной индикаторной головки (МИГ)



Рисунок 7 – Индикаторная головка (ИГ)



Рисунок 8 – Многооборотная индикаторная головка (МИГ)

Кратко принцип работы можно описать следующим образом: стрелки индикатора показывают величину, на которую перемещается шток относительно корпуса индикатора.

При отсутствии данных о характеристиках конкретного индикатора, цену деления шкал и пределы его измерения можно определить опытным путём. Цена деления шкалы большой стрелки всегда указана в центре основного циферблата.

Прогибомер Аистова

Прогибомер Аистова – Овчинникова (ПАО-6) закрепляется на жёстком основании непосредственно под точкой конструкции, вертикальное перемещение которой нам необходимо измерить. К конструкции крепится стальная проволока с подвешенной на конце с гирей 3, при этом проволока перекидывается через ролик 2, который находится с тыльной части прогибомера. Таким образом, при перемещении исследуемой точки конструкции, проволока проворачивает ролик 2, который жёстко соединён с шестерёнкой 1, которая в свою очередь находится в зацеплении с шестернями 4, 5 и 6. На каждой шестерни 1, 5 и 6 закреплена стрелка, каждая из которых показывает значения прогиба в см, мм и мкм соответственно.

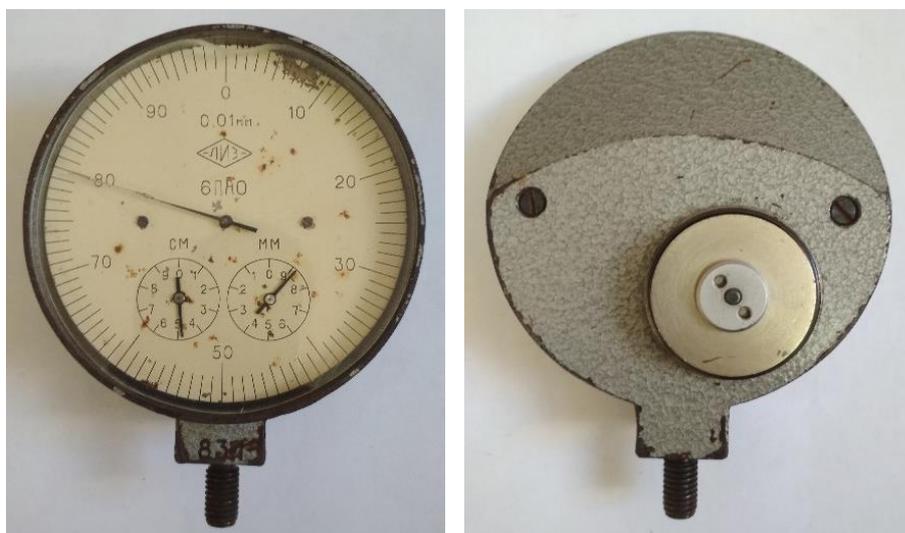


Рисунок 9 – Общий вид прогибомера Аистова



Рисунок 10 – Внутренне устройство прогибомера Аистова

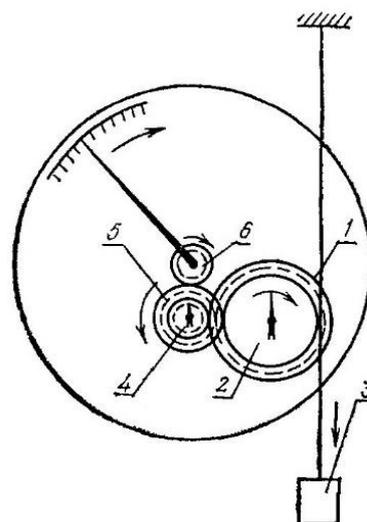


Рисунок 11 – Схема прогибомера Аистова

Особенностью прибора является высокая точность и неограниченный диапазон измерений.

Особенность конструкции в виде проволоки, которая перекинута через блок в том, что груз на конце проволоки создаёт постоянное натяжение проволоки, исключая тем самым дополнительную погрешность от возможного растяжения проволоки.

Прогибомер Максимова

Принцип установки и работы прогибомера Максимова (ПМ-3) аналогичен прогибомеру Аистова.



Рисунок 12 – Общий вид прогибомера Максимова

Прогибомер Максимова является менее дорогостоящим, менее прихотливым и менее точным аналогом прогибомера Аистова. Его основное отличие – точность измерения которая составляет 0,1мм.

Клинометр Аистова

Клинометр Аистова КА-4 состоит из латунного корпуса 1, внутри которого подвешен тяжёлый маятник 2 электроизолированный от корпуса, заканчивающийся веслом 6. При изменении угла наклона прибора маятник отклоняется под действием силы тяжести. Корпус до определённого уровня заполнен маслом. Весло маятника погружено в масло, что не даёт маятнику реагировать на мелкие вибрации во время измерений.

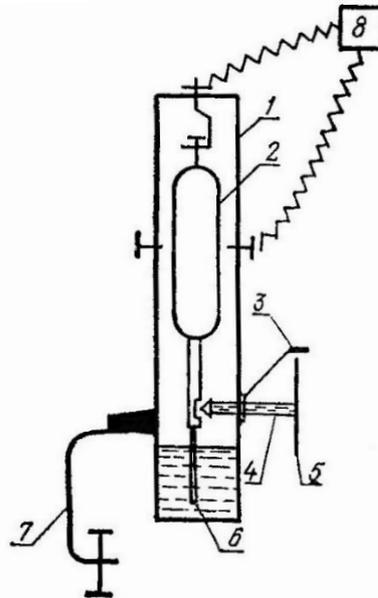


Рисунок 13 – Схема клинометра Аистова

Прибор крепится при помощи струбины 7 к конструкции. Для снятия нулевого отсчёта вращается микрометрический винт 4, до касания с маятником 2. В момент касания замыкается электрическая цепь с лампочкой 8 – снимается отсчёт по лимбу 5. 3 – неподвижная стрелка.

После нагружения конструкции маятник отклоняется, и электрическая цепь размыкается. После чего необходимо снова вращать микрометрический винт 4, до момента зажигания лампочки 8 и снова снять отсчёт по лимбу 5.

Таким образом, по разнице отсчёта лимба можно вычислить угол поворота конструкции.

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, перечислить изученные в лабораторной работе измерительные средства, а также отразить их основные особенности.

Контрольные вопросы:

1. Для чего может быть использовано каждое из изученных вами измерительных средств?
2. Назначение, правила использования и конструктивные особенности Тензометра Гугенбергера. Пределы и точность измерения, база измерения.
3. Назначение, правила использования, принцип работы и основные конструктивные особенности Тензорезисторов. Виды Тензорезисторов, их основные характеристики.

4. Назначение, правила использования и конструктивные особенности Индикаторов. Пределы и точность измерения. Виды индикаторов, их основные характеристики.
5. Назначение, правила использования и конструктивные особенности Прогибомеров Аистова и Максимова. Отличия прогибомеров.
6. Назначение, правила использования и конструктивные особенности Клинометра Аистова. Пределы и точность измерения.

Лабораторная работа № 2

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Цель работы: Произвести обработку результатов серии испытаний с помощью методов математической статистики. Оценить надёжность и достоверность экспериментальных данных.

Задачи работы:

- *определить среднее значение измеренной величины;*
- *оценить изменчивость измеренной величины;*
- *построить гистограмму и полигон распределения измеренной величины;*
- *отсеять недостоверные значения измеренной величины;*
- *оценить изменчивость среднего арифметического измеряемой величины;*
- *выполнить оценку сходимости расчетного и опытного значения измеряемой величины.*

Одной из основных целей проведения эксперимента (испытания конструкции) является сравнение значений величин, полученных путём предварительного расчёта конструкции со значениями, полученными непосредственно при испытании. А при отсутствии расчётного значения изучаемой величины – получение действительного значения изучаемой величины максимально приближенного к истинному.

Значения измеряемых характеристик изменяются от одного опыта к другому, эта изменчивость обусловлена неидеальными условиями проведения каждого эксперимента, такими как:

- *непостоянство физико-механических характеристик материалов;*
- *слабозаметные различия геометрических размеров опытных образцов;*
- *неизбежные погрешности показаний контрольно-измерительных приборов;*
и др.

Для того чтобы уменьшить влияние неидеальных условий и повысить надёжность результатов эксперимента, испытание необходимо провести несколько раз при одинаковых условиях.

Полученные в результате нескольких испытаний экспериментальные данные необходимо подвергнуть статистической оценке.

Статистическая оценка экспериментальных данных представляет собой комплекс несложных вычислений в результате которых решается две задачи:

- 1) является ли результат каждого отдельного испытания достоверным или его следует признать неудовлетворительным;
- 2) проверяется сходимость расчетного значения величины с опытным (достоверность опытного значения). Оценивается надёжность полученного действительного значения величины.

В случае ограниченного количества испытаний (ограниченной выборки), полученные значения в совокупности подчиняются закону распределения Стьюдента.

При количестве испытаний стремящимся к бесконечности закон распределения Стьюдента стремится к нормальному закону распределения (распределение Гаусса).

Порядок статистической оценки экспериментальных данных

В данном разделе описана методика статистической оценки малой выборки экспериментальных данных (менее 30 значений).

- 1) Вычисляем среднее значение измеренной величины.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

где x_i – значение полученное в результате каждого испытания;
 n – количество испытаний.

Вычисленное среднее значение может быть принято в качестве действительного значения измеряемой величины. При увеличении количества экспериментальных данных среднее (действительное) значение стремится к математическому ожиданию M (истинному значению измеряемой величины).

- 2) Вычисляем среднюю изменчивость изучаемой величины – **Среднеквадратическое отклонение.**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i^2)}{n - 1}}$$

где Δx_i – отклонение каждого измеренного значения от среднего арифметического: $\Delta x_i = \bar{x} - x_i$.

Среднеквадратическое отклонение s характеризует степень разброса полученных экспериментальных значений (изменчивость) изучаемой величины относительно среднего арифметического.

- 3) Строим гистограмму и полигон распределения результатов измерений.

Для начала необходимо определиться с интервалами варьирования. Величина интервала варьирования может быть принята равной среднеквадратическому отклонению s .

Заполняется таблица 1.

Таблица 1 – исходные данные для построения гистограммы распределения

Интервалы в общем виде	от $\bar{x} - 3s$ до $\bar{x} - 2s$	от $\bar{x} - 2s$ до $\bar{x} - s$	от $\bar{x} - s$ до \bar{x}	от \bar{x} до $\bar{x} + s$	от $\bar{x} + s$ до $\bar{x} + 2s$	от $\bar{x} + 2s$ до $\bar{x} + 3s$
Численные значения интервалов						
Количество значений попавших в интервалы, n_x						

По данным таблицы строится гистограмма распределения экспериментальных данных. В центре оси абсцисс устанавливается среднее значение \bar{x} , влево и вправо от него откладываются указанные выше интервалы. По оси ординат откладывается количество значений, попавших в эти интервалы (рис. 1).

После построения гистограммы по центрам вершин её столбцов строится полигон распределения изучаемой величины.

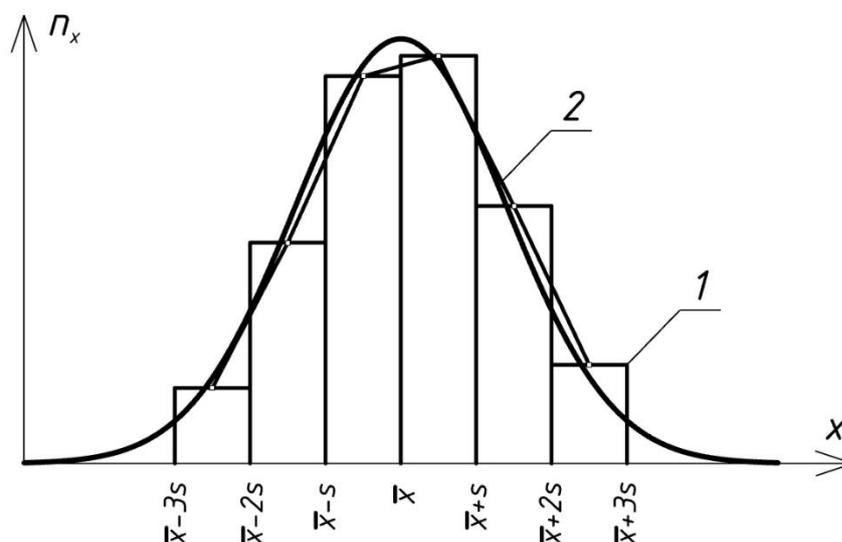


Рисунок 1 – Гистограмма (1), полигон (2) и аппроксимированная кривая распределения (3) изучаемой величины

4) Среди полученных результатов необходимо выявить и **отсеять anomalно большие и малые (недоверенные) значения результатов эксперимента**. Такие результаты могут быть получены по причине грубых промахов в процессе проведения испытания.

Существует несколько методов выявления недоверенных значений. Воспользуемся методом определения максимального относительного отклонения:

Для начала необходимо задаться доверительной вероятностью (гарантированной обеспеченностью) наших вычислений. Примем значение доверительной вероятности $P = 95\%$. Таким образом, результатом, который может встретиться с вероятностью $\alpha = 100\% - P = 5\%$ (уровень значимости), можно пренебречь.

Отдельный опытный результат признается недоверенным и отбрасывается, если он не удовлетворяет неравенству:

$$(\bar{x} - s \cdot \tau_{\alpha}) \leq x_i \leq (\bar{x} + s \cdot \tau_{\alpha})$$

где τ_{α} – квантиль распределения максимального относительного отклонения (определяется по таблице 2).

Таблица 2 – квантиль распределения максимального относительного отклонения для **двухсторонней критической области**

n	Уровень значимости α			n	Уровень значимости α		
	10%	5%	1%		10%	5%	1%
3	1.41	1.41	1.41	12	2.23	2.39	2.66
4	1.65	1.69	1.72	13	2.26	2.43	2.71
5	1.79	1.87	1.96	14	2.30	2.46	2.76
6	1.89	2.00	2.13	15	2.33	2.49	2.80
7	1.97	2.09	2.27	16	2.35	2.52	2.84
8	2.04	2.17	2.37	17	2.38	2.55	2.87
9	2.10	2.24	2.46	18	2.40	2.58	2.90
10	2.15	2.29	2.54	19	2.43	2.60	2.93
11	2.19	2.34	2.61	20	2.45	2.62	2.96

Строим границы, определённые неравенством, на уже построенной гистограмме распределения результатов испытания (рис. 2). Делаем заключение об отсеивании недостоверных результатов.

Прикладной смысл:

Результаты, вероятность получения которых составляет менее $\alpha = 5\%$, считаются недостоверными и отсеиваются.

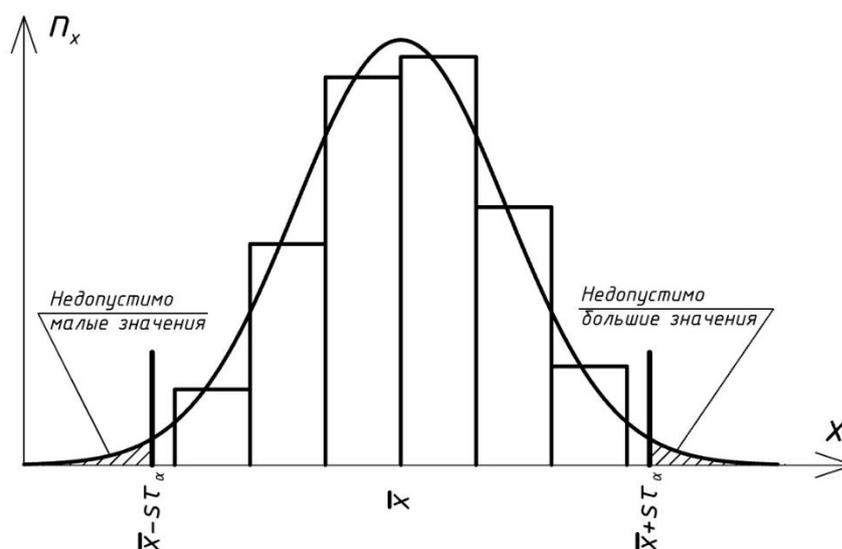


Рисунок 2 – границы недопустимо малых и недопустимо больших значений измерений

5) Проводим статистическую оценку **сходимости расчётного и опытного значения** изучаемой величины при доверительной вероятности $P = 95\%$.

Для этого необходимо вычислить ошибку среднего арифметического.

$$m_M = \frac{s}{\sqrt{n-1}}$$

Ошибка среднего арифметического m_M характеризует отклонение полученного среднего арифметического \bar{x} (действительного опытного значения) от математического ожидания M (истинного значения).

Сходимость признаётся удовлетворительной с доверительной вероятностью P , если расчётное значение M_{col} , которое может быть принято в качестве математического ожидания M (истинного значения), удовлетворяет неравенству:

$$(\bar{x} - t_\alpha \cdot m_M) \leq M_{col} \leq (\bar{x} + t_\alpha \cdot m_M)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности (определяется по таблице 3).

Таблица 3 – коэффициенты Стьюдента для *двухсторонней* критической области

n	Значение доверительной вероятности P			n	Значение доверительной вероятности P		
	90%	95%	99%		90%	95%	99%
2	6.31	12.71	63.66	12	1.80	2.2	3.11
3	2.92	4.30	9.92	13	1.78	2.18	3.08
4	2.35	3.18	5.84	14	1.77	2.16	3.11
5	2.13	2.78	4.60	15	1.76	2.14	2.98
6	2.02	2.57	4.03	16	1.75	2.13	2.95
7	1.94	2.45	3.71	17	1.75	2.12	2.92
8	1.89	2.36	3.50	18	1.74	2.11	2.90
9	1.86	2.31	3.36	19	1.73	2.10	2.88
10	1.83	2.26	3.25	20	1.73	2.09	2.86
11	1.81	2.23	3.17	∞	1,64	1,96	2,58

Строим границы, определённые неравенством, на уже построенной гистограмме распределения результатов испытания (рис. 3). Делаем заключение о сходимости результатов испытания и расчёта. Делаем заключение об истинном значении измеряемой величины.

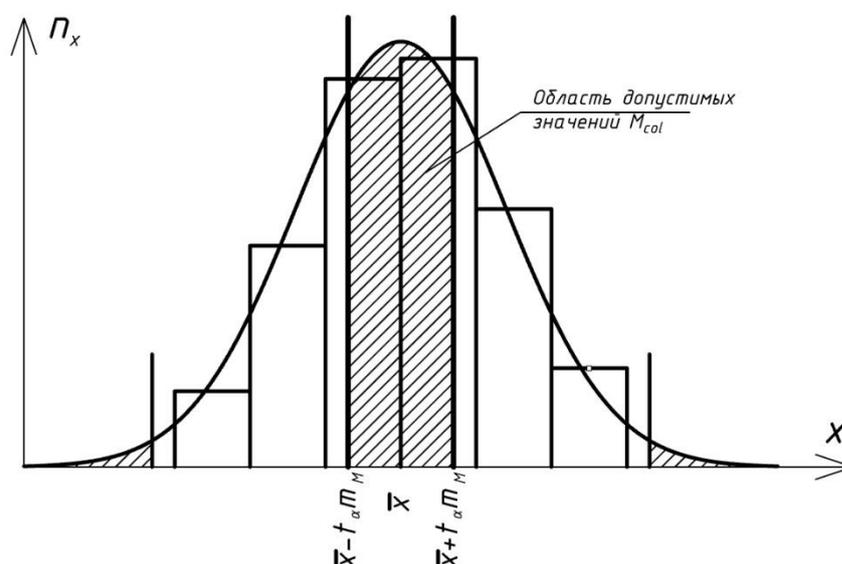


Рисунок 3 – Границы области допустимых значений M_{col}

Прикладной смысл:

- 1) Если расхождение между средним экспериментальным значением \bar{x} и значением, полученным в результате вычислений M_{col} , составляет менее $t_{\alpha} m_M$, то сходимость при заданном значении доверительной вероятности P признаётся удовлетворительной, а среднее экспериментальное значение \bar{x} признаётся достоверным.
- 2) При неизвестном значении M_{col} , истинное значение измеряемой величины (математическое ожидание M) находится в пределах абсолютной погрешности $\pm t_{\alpha} m_M$ от среднего арифметического значения \bar{x} с доверительной вероятностью P . Значения $\pm t_{\alpha} m_M$ и P характеризуют надёжность экспериментальных данных.

В **выводе** необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить среднее значение измеренной величины, погрешность и доверительную вероятность с которой была определена эта величина.

Контрольные вопросы:

1. Чем обусловлена изменчивость получаемых экспериментальных данных? Для чего необходимо производить статистическую оценку экспериментальных данных?
2. Что характеризует среднее арифметическое измеренных значений? Что характеризует среднеквадратическое отклонение? Что характеризует величина ошибки среднего арифметического?
3. Объясните принципы построения гистограммы и полигона распределения изучаемой величины.
4. Как происходит выявление и отсев недостоверных экспериментальных данных?
5. Объясните значение заштрихованных границ, обозначенных на гистограмме распределения изучаемой величины.
6. Как определяется сходимость и достоверность серии испытаний. Чем характеризуется достоверность?
7. Как определяется надёжность полученных экспериментальных данных. Чем она характеризуется?

Лабораторная работа № 3

ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С УЧЁТОМ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Цель работы: Провести испытание и изучить напряжённно-деформированное состояние стальной балки с учётом развития пластических деформаций.

Задачи работы:

- изучить стадии напряжённно-деформированного состояния стальной балки;
- ознакомиться с устройством стенда и работой приборов;
- выполнить обследование балки с регистрацией её геометрических параметров;
- провести испытание стальной балки;
- рассчитать механические напряжения и перемещения балки для заданной нагрузки, сравнить их с опытными значениями;
- рассчитать предельную нагрузку для I, II и III классов напряжённно-деформированного состояния;
- построить линию влияния балки.

При испытании балки на изгиб, по мере увеличения нагрузки, поперечное сечение поочерёдно достигает I, II и III класса напряжённно-деформированного состояния (НДС).

Подробно рассмотреть, как это происходит можно на примере балки с несимметричным по вертикали сечением (рис. 1). Нагрузку к балке будем прикладывать сверху вниз.

Во время нагружения все продольные «волокна» балки начинают испытывать напряжения. При этом, чем дальше от центра тяжести, тем выше их значения.

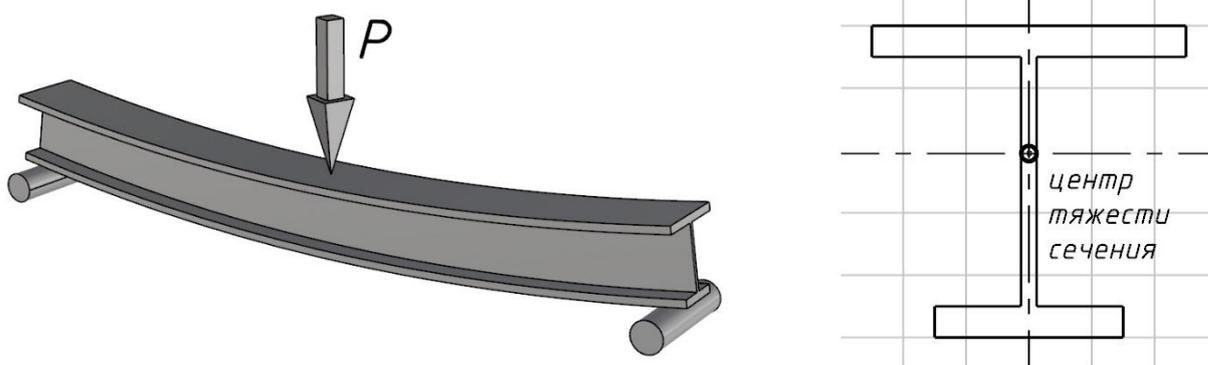


Рисунок 1 – Схема балки с несимметричным поперечным сечением, подвергнутая чистому изгибу

Таблица 1 – Очередность развития стадий НДС несимметричного сечения

№	Эпюры нормальных напряжений в несимметричном сечении	Описание
I		<p>I, упругая стадия работы поперечного сечения. Все продольные «волокна» поперечного сечения балки работают полностью в упругой стадии, напряжения постепенно увеличиваются</p>
I-II		<p>на границе I и II стадий НДС растянутые «волокна», наиболее удалённые от центра тяжести сечения первыми достигают предела текучести. Это явление называется краевой текучестью. Начинается II, упруго-пластическая работа поперечного сечения</p>
		<p>всё большее количество продольных «волокон» в растянутой зоне балки достигают предела текучести. В это время сжатая зона балки продолжает работать в упругой стадии.</p>
II		<p>по мере увеличения нагрузки сжатые «волокна» так же достигают предела текучести (краевая текучесть сжатой зоны)</p>
		<p>упруго-пластическая работа сечения продолжается как в сжатой, так и в растянутой зоне</p>
III		<p>в тот момент, когда полностью все сжатые и растянутые «волокна» достигают предела текучести, наступает III, пластическая стадия работы поперечного сечения. Это явление также называют шарниром пластичности, при котором балка неограниченно деформируется при постоянной нагрузке</p>

Ниже в таблице 2 приведены эпюры распределения нормальных напряжений в поперечном сечении для трёх стадий НДС при разных видах воздействия на стержневой элемент с симметричным поперечным сечением.

Таблица 2 – эпюры распределения нормальных напряжений для трёх стадий НДС. Симметричные сечения

Воздействие	Классы напряжённо-деформированного состояния		
	I упругая	II упруго-пластическая	III пластическая
Сжатие*			
Изгиб			
Сжатие с изгибом**			

* – в случае со сжатием, упруго-пластическая стадия условно отсутствует, т.к., если пренебречь силами трения в материале, предел текучести наступает по всему поперечному сечению одновременно;

** – эпюру напряжений для сжатия с изгибом можно рассматривать как сумму отдельных эпюр при сжатии и изгибе.

Проведение испытания

Испытательный стенд представляет собой основание с двумя шарнирными опорами, одна из которых подвижна. На стенде закреплена металлическая балка прямоугольного сечения. В центре пролёта балки наклеены два тензорезистора (измерение механических напряжений в сечении) на нижней и верхней поверхностях. Снизу в центре, под балкой установлен индикатор часового типа (измерение прогиба балки) (рис. 2).

Нагружение балки происходит путём установки грузов в центре траверсы.

Перед началом испытания необходимо провести обследование балки:

- определить геометрические характеристики испытываемой балки: высота сечения h , ширина сечения b , длина пролёта l_0 ;
- убедиться в правильности установки и работы измерительного оборудования;
- оценить соответствие расчётной схемы балки её фактическому закреплению на установке;
- выявить наличие дефектов.

В процессе проведения испытания каждая бригада загружает балку один раз грузами по 0,5 кг. Первая бригада 2 груза, все последующие бригады +1 груз. При этом до и после нагружения снимаются показания с тензорезисторов при помощи измерителя

деформации цифрового (ИДЦ) и с индикатора часового типа (ИЧ). Измеренные значения записываются в таблицу 3.

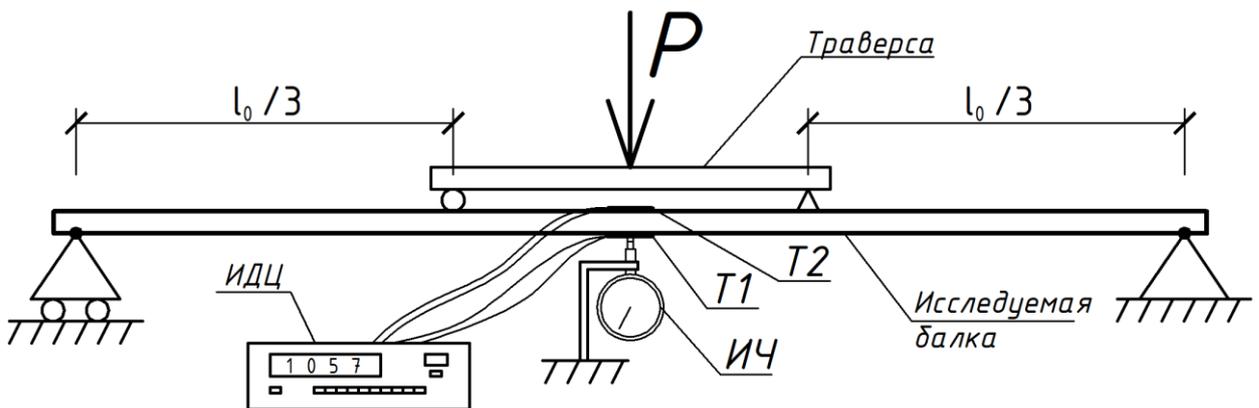


Рисунок 2 – Общий вид и схема испытательной установки

Таблица 3 – Результаты измерений

Измерение	Показания по ИЧ	Измерение	Показания по ИДЦ	
			T1 низ	T2 верх
до нагружения, ϑ_0 , мм		до нагружения, ЕОД ₀		
после нагружения, ϑ_1 , мм		после нагружения, ЕОД ₁		
прогиб $\vartheta_{оп} = \vartheta_1 - \vartheta_0$, мм		$\Delta\text{ЕОД} = \text{ЕОД}_1 - \text{ЕОД}_0$		
геометрические параметры балки, мм	l_0	1000		
	b	39,1		
	h	6,9		
нагрузка, кг	P			
		относительная деформация «волокон», мкм/м		
		механические напряжения, $\sigma_{оп}$, МПа		

Переводим единицы относительной деформации (ЕОД) в относительную деформацию «волокон» балки:

$$\varepsilon = \Delta \text{ЕОД} \cdot S, \text{ мкм/м}$$

где S – коэффициент преобразования, зависящий от чувствительности и схемы подключения тензорезисторов, в нашем случае принимается $S = 0,909$.

Переводим относительную деформацию «волокон» в механические напряжения:

$$\sigma_{\text{оп}} = \varepsilon \cdot E, \text{ МПа}$$

где E – модуль упругости стали, принимается равным 210 ГПа.

Аналогичные расчёты проводим как для показаний по тензорезистору 1, так и по тензорезистору 2, записываем в таблицу.

Определение расчётных значений и сравнение их с опытными

1) Вычисление расчётного значения прогиба.

$$\vartheta_p = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot l_0^3}{2 \cdot E \cdot J}, \text{ мм}$$

где l_0 – расчётная длина пролёта, мм;
 J – момент инерции поперечного сечения балки, для прямоугольного сечения вычисляется по формуле $J = \frac{b \cdot h^3}{12}$, мм⁴;
 F – прилагаемая нагрузка, Н, вычисляется по формуле $F = P \cdot g$, где g – ускорение свободного падения.

2) Вычисление относительного расхождения расчётного и опытного значений прогибов.

$$\Delta \vartheta = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{\text{оп}}}{\vartheta_p} \cdot 100, \%$$

3) Вычисление расчётного значения механического напряжения.

$$\sigma_p = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l_0}{6 \cdot W}, \text{ МПа}$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения балки, для прямоугольного сечения вычисляется по формуле $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$, мм³.

- 4) Вычисление относительного расхождения расчётного и опытного значений напряжений.

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_p - \sigma_{оп}}{\sigma_p} \cdot 100, \%$$

Сравнение расчётных и опытных значений напряжений проводим как для показаний по тензорезистору 1, так и по тензорезистору 2, записываем в таблицу.

Определение критических нагрузок для стадий НДС

Переход из одной стадии напряжённо-деформированного состояния в другую происходит при достижении определённого значения критической нагрузки. Определим эти значения для исследуемой балки:

Исследуемая балка выполнена из стали класса прочности С235 с пределом текучести $f_y = 235$ МПа.

- 1) Критическая нагрузка для перехода поперечного сечения в упруго-пластическую стадию (I - II стадия НДС).

$$P_{el} = \frac{6 \cdot M_{el}}{l_0} = \frac{6 \cdot (f_y \cdot W)}{l_0} = _, \text{ Н} = _, \text{ кг}$$

- 2) Критическая нагрузка для предельно разрешённых по нормативным документам упруго-пластических деформаций (II стадия НДС).

$$P_{el-pl} = \frac{6 \cdot M_{el-pl}}{l_0} = \frac{6 \cdot (f_y \cdot W \cdot k_1)}{l_0} = _, \text{ Н} = _, \text{ кг}$$

где k_1 – коэффициент учитывающий предельно разрешённое развитие пластических деформаций в прямоугольном сечении, принимаем $k = 1,15$.

- 3) Критическая нагрузка для перехода поперечного сечения в пластическую работу – образование пластического шарнира (III стадия НДС). *Формула действительна только для прямоугольного поперечного сечения*

$$P_{pl} = \frac{6 \cdot M_{pl}}{l_0} = \frac{6 \cdot (f_y \cdot W \cdot 1.5)}{l_0} = _, \text{ Н} = _, \text{ кг}$$

Построение опытной линии влияния

Линию влияния строим для двухшарнирно опертой балки с консолью с левой стороны, установленной на том же стенде.

На балку в характерных точках устанавливается груз массой 3 кг. При каждом нагружении снимаются показания прогиба или напряжения в одной из характерных точек.

По данным полученным в результате испытания строится опытная линия влияния (рис. 3).

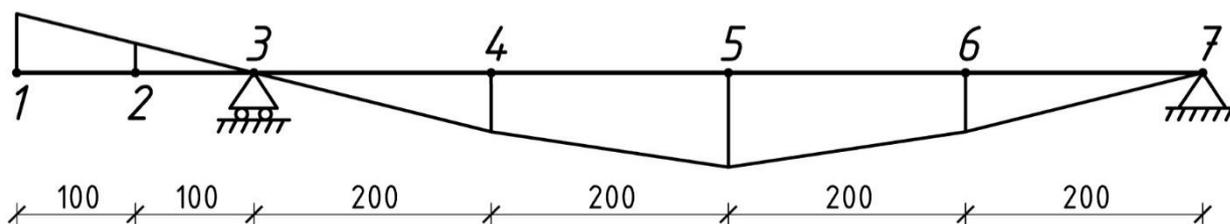


Рисунок 3 – Пример линии влияния прогиба. Линия влияния в точке 5, получена в результате испытания

В **выводе** необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить расхождение между опытными и расчётными значениями напряжений и прогибов балки, а также указать величину трёх критических нагрузок для испытываемой балки.

Контрольные вопросы:

1. Опишите порядок и принцип развития напряжений в поперечном сечении металлической балки на всех стадиях напряжённо-деформированного состояния.
2. Чем отличается распределение напряжений в поперечном сечении металлического элемента на различных стадиях НДС при различных воздействиях?
3. Опишите испытательную установку и расположение измерительных средств на ней.
4. Опишите порядок нагружения балки и порядок фиксации показаний измерительных средств.
5. Какой процент отклонения расчётных и опытных значений вы получили по результатам испытания и расчёта? Какие величины вы сравнивали?
6. Какие величины критических нагрузок вы получили? Объясните, что будет происходить с испытываемой балкой, в случае её нагружения полученными вами нагрузками.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ И РАСЧЁТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСИНЫ

Цель работы: Определить пределы прочности и модули упругости древесины по результатам различных испытаний. Определить расчётные значения прочности и модуля упругости древесины.

Задачи работы:

- *определить предел прочности и модуль упругости древесины при сжатии вдоль волокон;*
- *определить предел прочности и модуль упругости древесины при сжатии поперёк волокон;*
- *определить предел прочности древесины при растяжении волокон;*
- *определить предел прочности древесины при скалывании вдоль волокон;*
- *получить расчётные значения прочности и модуля упругости древесины.*

Механические свойства древесины сильно отличаются в зависимости от вида и направления приложения воздействия (анизотропия механических характеристик). На рисунках 1 и 2 представлены диаграммы напряжённо-деформированного состояния при различных испытаниях древесины Сосны.

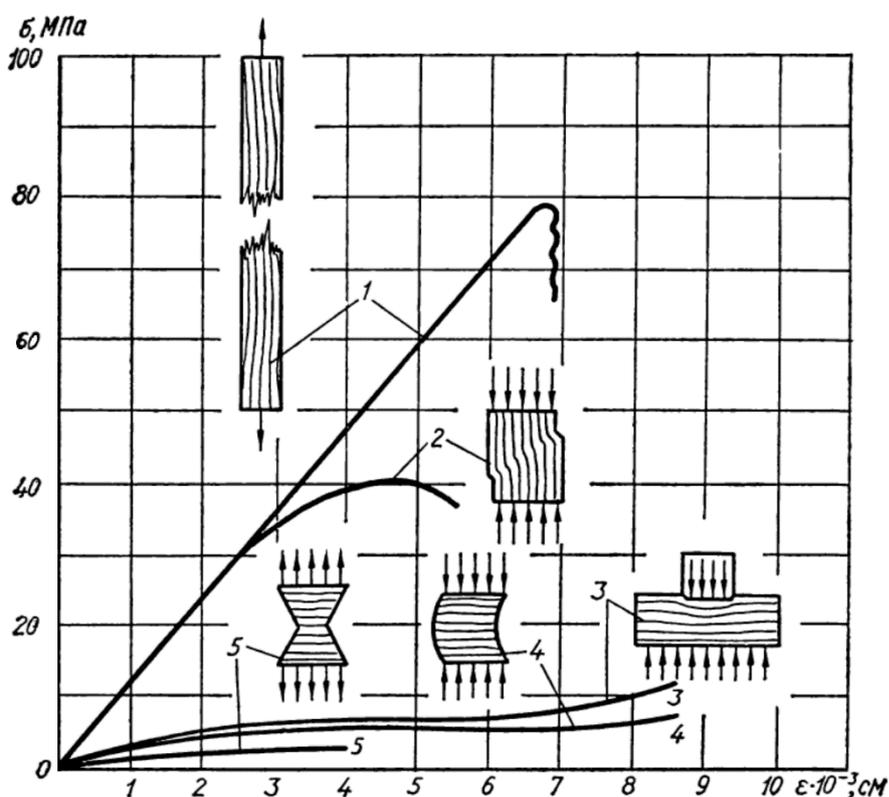


Рисунок 1 – диаграммы напряжённо-деформированного состояния $\sigma(\epsilon)$ при испытании древесины на сжатие и растяжение: 1 – растяжение вдоль волокон; 2 – сжатие вдоль волокон; 3 – местное сжатие поперёк волокон; 4 – сжатие поперёк волокон; 5 – растяжение поперёк волокон

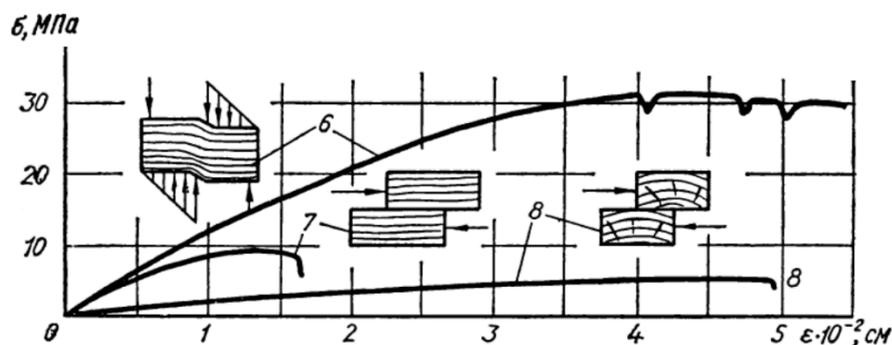


Рисунок 2 – диаграммы напряжённо-деформированного состояния $\sigma(\varepsilon)$ при испытании древесины на срез (скалывание): 6 – перерезание волокон; 7 – скалывание вдоль волокон; 8 – скалывание поперёк волокон

Испытание древесины на сжатие вдоль волокон

ГОСТ 16483.10-73 – определение предела прочности при сжатии вдоль волокон.

ГОСТ 16483.24-73 – определение модуля упругости при сжатии вдоль волокон.

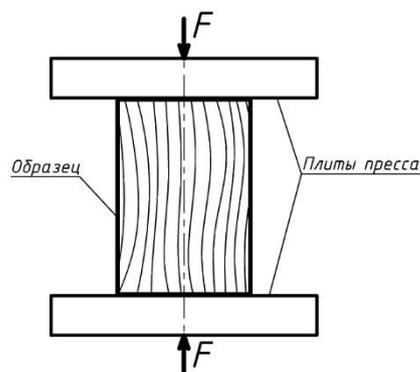


Рисунок 3 – Схема испытания. Сжатие вдоль волокон

Предел прочности образца при испытании древесины на сжатие вдоль волокон вычисляется по формуле:

$$R_{сж1} = \frac{F_u}{a \cdot b}, \text{ МПа}$$

где F_u – максимальная нагрузка, которую выдержал образец, кН;
 a и b – ширина и глубина образца 20x20, мм.

Модуль упругости образца при испытании древесины на сжатие вдоль волокон вычисляется по формуле:

$$E_{сж1} = \frac{F \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta l}, \text{ МПа}$$

где F – нагрузка при которой взят отсчёт по тензOMETрам, кН;
 l – база тензOMETра 20 мм;
 Δl – среднее значение перемещения, полученное по двум тензOMETрам, мм.

Испытание древесины на сжатие поперёк волокон

ГОСТ 16483.11-73 – определение условного предела прочности при сжатии поперёк волокон.

ГОСТ 16483.25-73 – определение модуля упругости при сжатии поперёк волокон.

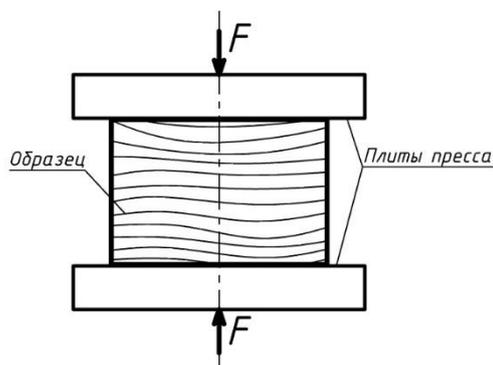


Рисунок 4 – Схема испытания. Сжатие поперёк волокон

Предел прочности образца при испытании древесины на сжатие поперёк волокон вычисляется по формуле:

$$R_{\text{сж2}} = \frac{F_u}{a \cdot b}, \text{ МПа}$$

где F_u – нагрузка, соответствующая условному пределу прочности, кН;
 a и b – ширина и глубина образца 20x30, мм.

Модуль упругости образца при испытании древесины на сжатие поперёк волокон вычисляется по формуле:

$$E_{\text{сж2}} = \frac{F \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta l}, \text{ МПа}$$

где F – нагрузка при которой взят отсчёт по тензотрам, кН;
 l – база тензометра, 20 мм;
 Δl – среднее значение перемещения, полученное по двум тензотрам, мм.

Испытание древесины на растяжение вдоль волокон

ГОСТ 16483.23-73 – определение предела прочности при растяжении вдоль волокон.

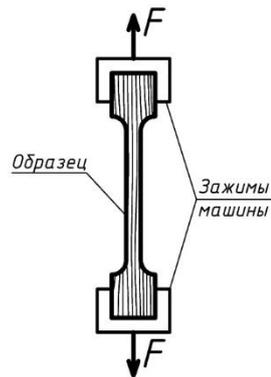


Рисунок 5 – Схема нагружения. Растяжение вдоль волокон

Предел прочности образца при испытании древесины на растяжение вдоль волокон вычисляется по формуле:

$$R_p = \frac{F_u}{a \cdot b}, \text{ МПа}$$

где F_u – максимальная нагрузка, которую выдержал образец, кН;
 a и b – ширина и глубина рабочей зоны образца 4x20 мм.

Испытание древесины на скалывание вдоль волокон

ГОСТ 16483.5-73 – определение предела прочности при скалывании вдоль волокон.

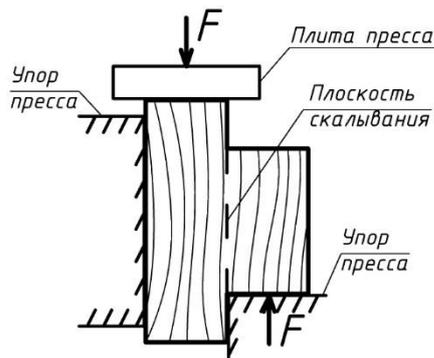


Рисунок 6 – Схема нагружения. Скалывание вдоль волокон

Предел прочности образца при испытании древесины на скалывание вдоль волокон вычисляется по формуле:

$$R_{ск} = \frac{F_u}{b \cdot l}, \text{ МПа}$$

где F_u – максимальная нагрузка, которую выдержал образец, кН;
 b и l – ширина и высота рабочей зоны образца, 20x30 мм.

Модуль упругости и предел прочности древесины сильно зависят от её влажности. Поэтому, непосредственно перед испытанием, определяют влажность материала образца W . Нормальной влажностью при которой нормируются модуль упругости и предел прочности является $W = 12\%$.

Необходимо произвести перерасчёт полученных модулей упругости и пределов прочности на значения при нормативной влажности 12% по формулам:

$$R_{12} = R_W \cdot [1 + \alpha \cdot (W - 12)], \text{ МПа}$$

$$E_{12} = \frac{E_W}{[1 - \alpha \cdot (W - 12)]}, \text{ МПа}$$

где α – поправочный коэффициент;
 W – влажность образца при испытании, %.

Таблица 1 – значения коэффициента α для всех пород древесины

	Сжатие вдоль волокон	Сжатие поперёк волокон	Растяжение вдоль волокон	Скалывание вдоль волокон
Для предела прочности R	0,04	0,035	0,01	0,03
Для модуля упругости E	0,012	0,033	0,012	-

Пересчитываем все полученные значения модуля упругости и предела прочности древесины на значения, соответствующие нормальной влажности.

Нормативные значения прочности древесины R_k получаются по результатам серии испытаний. Результаты испытаний обрабатываются статистическими методами (см. Лабораторная работа № 2). Нормативные значения получают с гарантированной обеспеченностью 95%.

Принимаем полученные в результате испытаний значения модулей упругости в качестве средних, а значения прочности в качестве нормативных. Вычисляем расчётные значения модулей упругости и расчётные значения сопротивления материала для всех результатов испытаний:

В соответствии с ТКП EN 1995-1-1 «Проектирование деревянных конструкций»: Расчётное сопротивление элемента R_d вычисляется по формуле:

$$R_d = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_m}, \text{ МПа}$$

где R_k – нормативное значение прочности древесины, при нормативной влажности 12%, МПа;

γ_m – частный коэффициент свойств материала, примем равным:

1,22 – сжатие вдоль волокон;

1,25 – сжатие поперёк волокон;

1,40 – растяжение вдоль волокон;

1,30 – скалывание вдоль волокон;

k_{mod} – коэффициент модификации, учитывающий эффект длительности действия нагрузки и класс условий эксплуатации, примем равным 0,55.

Расчётное значение модуля упругости элемента E_d вычисляется по формуле:

$$E_d = \frac{E}{\gamma_m}, \text{ МПа}$$

где E – среднее значение модуля упругости, полученное в результате испытания при нормативной влажности 12%, МПа.

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить нормативные и расчётные значения прочностей и модулей упругости для нормальной влажности 12% по результатам всех четырёх испытаний.

Контрольные вопросы:

1. Опишите прочностные характеристики древесины в зависимости от расположения волокон относительно прикладываемой нагрузки на примере диаграммы $\sigma(\varepsilon)$.
2. Опишите методики проведения испытания древесины на сжатие вдоль и поперёк волокон.
3. Опишите методики проведения испытания древесины на растяжение и скалывание вдоль волокон.
4. При какой влажности древесины нормируется её прочность? Как получить нормативные значения прочности и модуля упругости древесины по результатам испытания?
5. Как определяются расчётные значения прочности и модуля упругости для проектирования деревянных конструкций.

Лабораторная работа № 5

ИСПЫТАНИЕ ДЕРЕВЯННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ

Цель работы: Провести испытание и изучить напряжённо-деформированное состояние двух деревянных балок.

Задачи работы:

- *изучить стадии напряжённо-деформированного состояния деревянной балки;*
- *ознакомиться с устройством стэнда и работой приборов;*
- *выполнить обследование балок с регистрацией их геометрических параметров;*
- *провести испытания деревянных балок в упругой стадии;*
- *рассчитать механические напряжения и перемещения балок для заданной нагрузки, сравнить их с опытными значениями;*
- *рассчитать предельную нагрузку для перехода балки в упруго-пластическую стадию работы.*

При испытании деревянной балки на изгиб по мере увеличения нагрузки поперечное сечение проходит через несколько характерных этапов работы.

Подробно рассмотреть, как это происходит можно на примере балки с симметричным прямоугольным сечением. Волокна древесины направлены вдоль оси балки. Нагрузку к балке будем прикладывать сверху вниз (рис. 1).

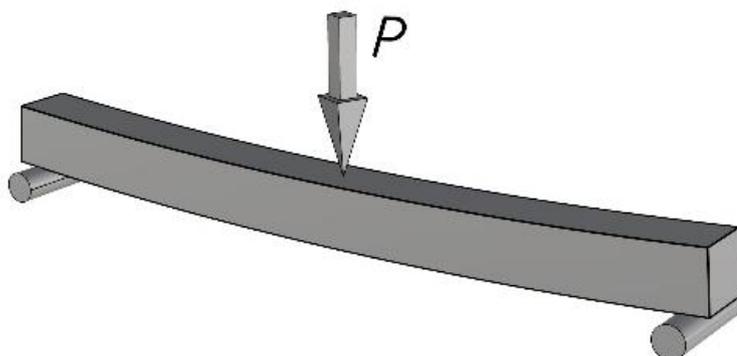


Рисунок 1 – Схема балки с симметричным поперечным сечением, подвергнутой чистому изгибу

Во время нагружения все продольные волокна балки начинают испытывать напряжения. При этом, чем дальше от центра тяжести, тем выше их значения (табл. 1).

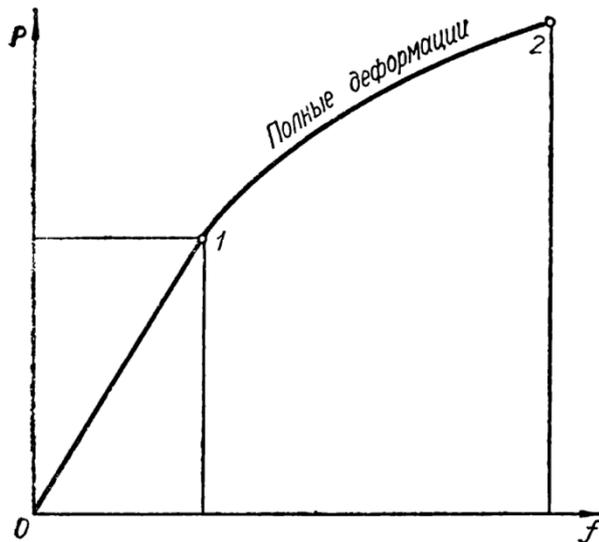


Рисунок 2 – График зависимости прогиба балки и нагрузки: 0-1 упругая стадия работы всего сечения; 1-2 в сжатой зоне волокна в пластической стадии, в растянутой – в упругой; 2 – разрушение растянутых волокон

Таблица 1 – Очерёдность развития стадий НДС сечения

№	Эпюра нормальных напряжений в сечении	Описание
I		на первом этапе, полностью упругой стадии работы поперечного сечения, напряжения постепенно увеличиваются
II		разрушения начинаются в сжатой зоне, где появляются складки, отражающие появление пластических деформаций волокон балки. <i>Из предыдущей работы мы знаем, что прочность древесины на сжатие вдоль волокон приблизительно в 2 раза меньше чем на растяжение, поэтому первой разрушается сжатая зона</i>
III		зона пластичности развивается в глубь сечения и нейтральная ось перемещается в сторону растянутой зоны, т.к. в сжатой зоне материал уже частично потерял свою несущую способность. В нижней зоне растут растягивающие напряжения. Наиболее растянутые волокна достигают предела прочности. Происходит разрушение балки

Проведение испытания

Испытательный стенд представляет собой основание с двумя шарнирными опорами, одна из которых подвижна. На стенде закреплена балка прямоугольного сечения. В центре пролёта балки снизу наклеен тензорезистор (измерение механических напряжений в сечении). Снизу в центре, под балкой установлен индикатор часового типа (измерение прогиба балки) (рис. 2).

Для того чтобы наглядно убедиться в том, что балки с разным направлением расположения волокон имеют разную жёсткость и прочность, на стенде поочерёдно испытывается две балки.

В первой балке Б1 волокна расположены вдоль оси балки. Во второй Б2 – поперёк оси балки.

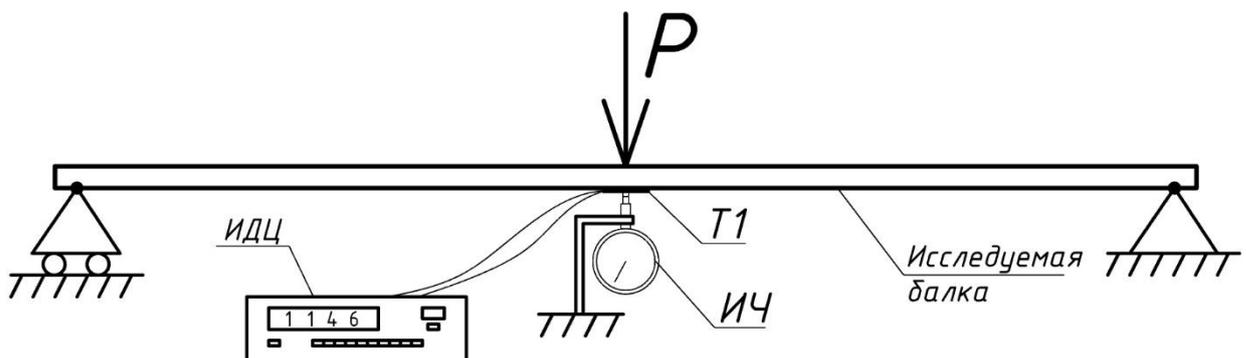


Рисунок 2 – Общий вид и схема испытательной установки

Нагружение балки происходит путём установки грузов в центре балки.

Перед началом испытания необходимо провести обследование балки:

- определить геометрические характеристики испытываемой балки: высота сечения h , ширина сечения b , длина пролёта l_0 ;
- убедиться в правильности установки и работы измерительного оборудования;
- оценить соответствие расчётной схемы балки её фактическому закреплению на установке;

- выявить наличие дефектов.

В процессе проведения испытания каждая бригада загружает балку Б1 один раз грузами по 0,5 кг. Первая бригада 2 груза, все последующие бригады +1 груз. При этом до и после нагружения снимаются показания с тензорезистора при помощи измерителя деформации цифрового (ИДЦ) и с индикатора часового типа (ИЧ). Измеренные значения записываются в таблицу 2.

После испытания балки Б1 всеми бригадами, аналогично испытывается балка Б2. Каждая бригада загружает балку Б2 один раз грузами по 0,1 кг. Первая бригада 2 груза, все последующие бригады +1 груз.

Таблица 2 – результаты измерений

Измерение	Показания по ИЧ		Измерение	Показания по ИДЦ	
	Б1	Б2		Б1	Б2
до нагружения, ϑ_0 , мм			до нагружения, ЕОД ₀		
после нагружения, ϑ_1 , мм			после нагружения, ЕОД ₁		
прогиб $\vartheta_{оп} = \vartheta_1 - \vartheta_0$, мм			$\Delta\text{ЕОД} = \text{ЕОД}_1 - \text{ЕОД}_0$		
модуль упругости, $E_{оп}$, МПа			относительная деформация волокон, мкм/м		
			механические напряжения, $\sigma_{оп}$, МПа		

Характеристика	Б1	Б2
геометрические параметры балки, мм	l_0	
	b	
	h	
нагрузка, кг	P	

Переводим единицы относительной деформации (ЕОД) в относительную деформацию волокон:

$$\varepsilon = \Delta\text{ЕОД} \cdot S, \text{ мкм/м}$$

где S – коэффициент преобразования, зависящий от чувствительности и схемы подключения тензорезисторов, принимается равным $S = 0,909$.

По значению прогиба вычисляем опытное значение модуля упругости:

$$E_{оп} = \frac{F \cdot l_0^3}{48 \cdot \vartheta_{оп} \cdot J}, \text{ МПа}$$

где l_0 – расчётная длина пролёта, мм;
 J – момент инерции поперечного сечения балки, для прямоугольного сечения рассчитывается по формуле $J = \frac{b \cdot h^3}{12}$, мм⁴;
 F – прилагаемая нагрузка, Н, вычисляется по формуле $F = P \cdot g$, где g – ускорение свободного падения.

Переводим относительную деформацию волокон в механические напряжения:

$$\sigma_{\text{оп}} = \varepsilon \cdot E_{\text{оп}}, \text{ МПа}$$

Определение расчётных значений и сравнение их с опытными

- 1) Вычисление расчётного значения прогиба.

$$\vartheta_p = \frac{F \cdot l_0^3}{48 \cdot E_p \cdot J}, \text{ мм}$$

где E_p – нормальный модуль упругости древесины Сосны, для балки Б1 принимаем значение 10 000 МПа, для балки Б2 принимаем значение 400 МПа.

- 2) Вычисление относительного расхождения расчётного и опытного значения прогибов.

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{\text{оп}}}{\vartheta_p} \cdot 100, \%$$

- 3) Вычисление расчётного значения механического напряжения.

$$\sigma_p = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l_0}{4 \cdot W}, \text{ МПа}$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения балки, для прямоугольного сечения рассчитывается по формуле $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$, мм³.

- 4) Вычисление относительного расхождения расчётного и опытного значения напряжений.

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_p - \sigma_{\text{оп}}}{\sigma_p} \cdot 100, \%$$

Указанные выше расчёты проводим как для балки Б1, так и для балки Б2.

Для балки Б1 вычислим величину критической нагрузки для перехода балки в упруго-пластическую стадию работы.

$$P_{el-pl} = \frac{4 \cdot M_{el-pl}}{l_0} = \frac{4 \cdot (R_{сж} \cdot W)}{l_0} = \text{---}, \text{Н} = \text{---}, \text{кг}$$

где $R_{сж}$ – нормативная прочность древесины на сжатие вдоль волокон, МПа (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №4).

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить расхождение между опытными и расчётными значениями напряжений и прогибов обеих испытанных балок.

Контрольные вопросы:

1. Опишите порядок и принцип развития напряжений в поперечном сечении деревянной балки на всех стадиях напряжённо-деформированного состояния.
2. Опишите испытательную установку и расположение измерительных средств на ней.
3. Опишите порядок нагружения балки и порядок фиксации показаний измерительных средств.
4. Какой процент отклонения расчётных и опытных значений вы получили по результатам испытания и расчёта? Какие величины вы сравнивали?
5. Почему проводилось испытание двух балок? Охарактеризуйте жёсткость и прочность двух испытанных вами деревянных балок. Что произойдёт при нагружении балки Б1 рассчитанной вами нагрузкой P_{el-pl} ?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРМАТУРНЫХ СТАЛЕЙ. КЛАССЫ АРМАТУРНЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: Изучить классификацию арматуры. Определить механические характеристики арматуры по результатам испытания.

Задачи работы:

- *изучить классификацию арматуры;*
- *провести испытание стального арматурного стержня на растяжение до разрушения;*
- *произвести обработку полученного графика напряжённо-деформированного состояния;*
- *получить расчётные значения прочности и модуля упругости древесины.*

Арматуру в железобетонных конструкциях устанавливают преимущественно для восприятия растягивающих усилий и усиления бетона в сжатых зонах конструкций.

Арматура, устанавливаемая по расчету, называется рабочей; устанавливаемая по конструктивным и технологическим соображениям – монтажной.

Таблица 1 – Разновидности арматуры, изготавливаемой по СТБ

Общие характеристики арматуры		Классы прочности арматуры по СТБ						
		S240	S500		S540	S800	S1200	S1400
Предел текучести, МПа		240	500		540	800	1200	1400
Диаметр, мм		6-40	4-40	4-5,5	16-36	10-40	10-40	3-8
Наличие площадки текучести		+			-			
Способ изготовления		горячая прокатка	определяется изготовителем	холоднодеформированная	горячая прокатка упрочнённая вытяжкой	горячая прокатка термически упрочнённая	горячая прокатка термически упрочнённая	холодное волочение
Способ применения		непреднапрягаемая			преднапрягаемая			
Форма поверхности	гладкая	+		+				+
	периодического профиля		+		+	+	+	+
По виду	стержневая	+	+		+	+	+	
	проволочная			+				+
Нормативный документ		СТБ 1704		СТБ 1341	СТБ 1701	СТБ 1706		
Ссылка на схему профиля			рис. 1,2		рис. 3	рис. 1	рис. 1	рис. 4

Помимо указанной выше арматуры, изготавливаемой по СТБ, в Республике Беларусь также могут применять арматуру, изготовленную по следующим стандартам:

- ГОСТ 13840-68 – Арматура канатная, СССР (К7);
- ТУ 14-4-22-71 – Арматура канатная, СССР (К19);
- ГОСТ 6727-80 – Арматура проволочная, СССР (ВР-I изготавливает БМЗ, г. Жлобин);
- ГОСТ 5781-82 – Арматура стержневая, СССР (А240 и А400 изготавливает БМЗ, г. Жлобин);

- ГОСТ 10884-94 – Арматура стержневая, Россия (Ат800 изготавливает БМЗ, г. Жлобин);
- ГОСТ 7348-81 – Арматура проволочная, СССР (В-II и ВР-II) и др.

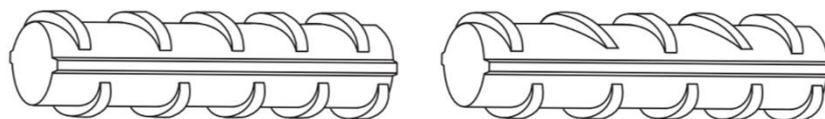


Рисунок 1 – Общий вид периодического профиля арматуры: серповидный профиль Ø6-40 S500, S800 и S1200



Рисунок 2 – Общий вид периодического профиля арматуры: специальный профиль Ø4-16 S500

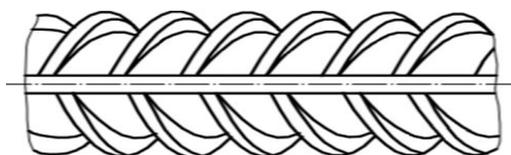


Рисунок 3 – Общий вид периодического профиля арматуры: кольцевой профиль S540

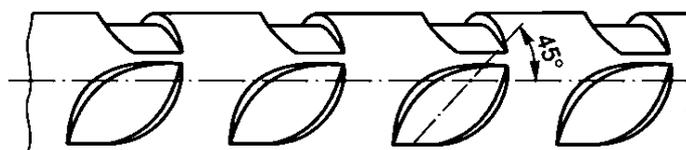


Рисунок 4 – Общий вид периодического профиля арматуры: специальный периодический профиль S1400

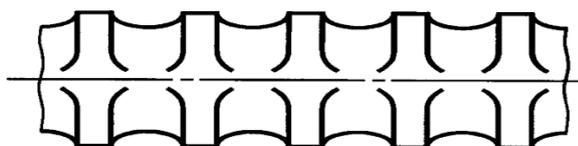


Рисунок 5 – Общий вид периодического профиля арматуры: арматура проволочная ВР-I (ГОСТ 6727-80), класс S500, Ø3-5 мм, твёрдая сталь

Прочностные и деформативные характеристики арматурных сталей устанавливают по диаграмме $\sigma(\epsilon)$, получаемой по результатам испытания образцов из мягкой или твердой стали на растяжение (рис. 6).

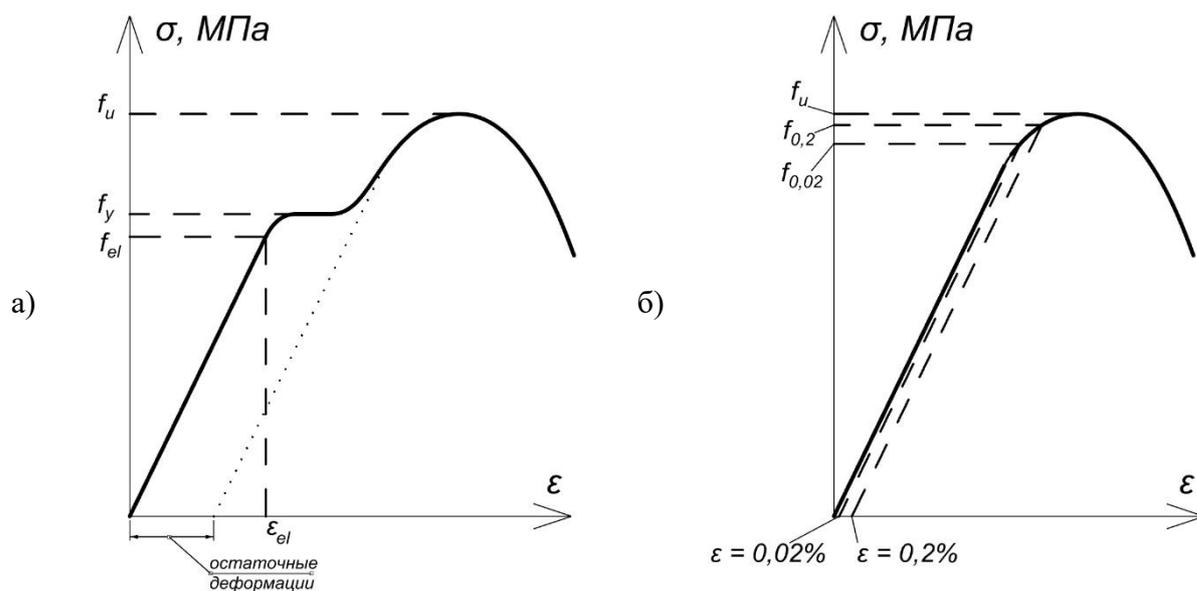


Рисунок 6 – Диаграммы напряжённо-деформированного состояния при растяжении образцов арматуры:
а – мягкая сталь, б – твёрдая сталь

Для преднапряжённых конструкций используется арматура только с условным пределом текучести, так как в таких конструкциях не допускаются пластические деформации арматуры.

Одним из способов упрочнения арматуры является способ её вытяжки в холодном состоянии. Арматура с физическим пределом текучести растягивается с таким усилием, чтобы она преодолела предел текучести, но не достигла временного сопротивления. После чего нагрузка снимается, и арматура возвращается в исходное состояние с остаточными деформациями (пунктирная линия на рисунке ба). После такой процедуры эта арматура уже характеризуется как арматура из твёрдой стали с условным пределом текучести и с возможностью использования в преднапряжённых конструкциях.

f_{el} – предел упругости.

f_y – физический предел текучести.

f_u – временное сопротивление.

$f_{0,02}$ – условный предел упругости (если в момент достижения материалом условного предела упругости полностью снять нагрузку, то после не полного возвращения образца в начальное состояние, его остаточные деформации составят 0,02%).

$f_{0,2}$ – условный предел текучести (если в момент достижения материалом условного предела текучести полностью снять нагрузку, то после не полного возвращения образца в начальное состояние, его остаточные деформации составят 0,2%).

Помимо стальной также может применяться композитная арматура, наибольшее распространение имеет её разновидность – стеклопластиковая арматура.

Стеклопластиковая арматура – стержень, представляющий собой пучок стеклянных волокон с навивкой из того же материала. Волокна скрепляются посредством пропитывания их полимерным связующим.

Преимущества и недостатки стеклопластиковой арматуры по сравнению с металлической приведены ниже.

Преимущества:

- высокая предельная прочность;
- коррозионная стойкость;
- малый вес;
- низкая теплопроводность;
- не проводит электричество, не имеет экранирующих свойств.

Недостатки:

- низкая жёсткость ($E \approx 50$ ГПа);
- не поддаётся изгибу под малым радиусом;
- малый предел прочности на срез (≈ 150 МПа);
- хрупкий характер разрушения;
- низкая теплостойкость ($\approx 200^\circ\text{C}$);
- необходимость использования специальных средств защиты при обработке.

Особенности:

- соединение стержней только вязкой;
- прочность на сжатие в 2 раза меньше, чем на растяжение;
- высокая гибкость. Как правило поставляется в бухтах.



Рисунок 7 – Общий вид стеклопластиковой арматуры

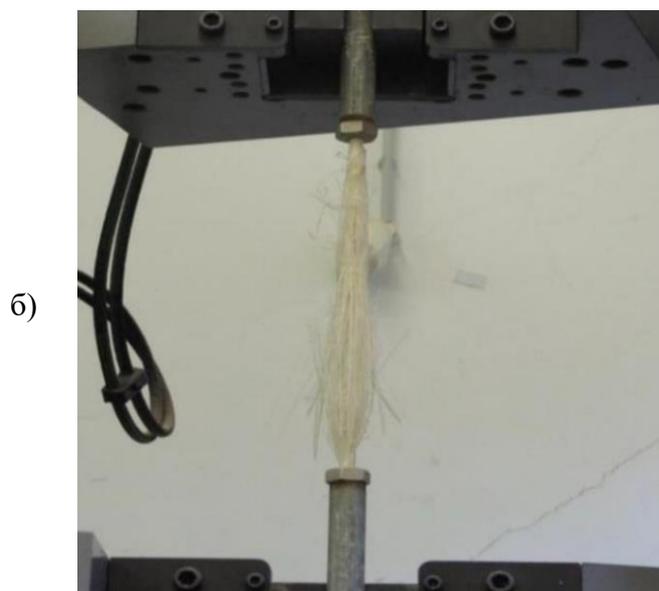
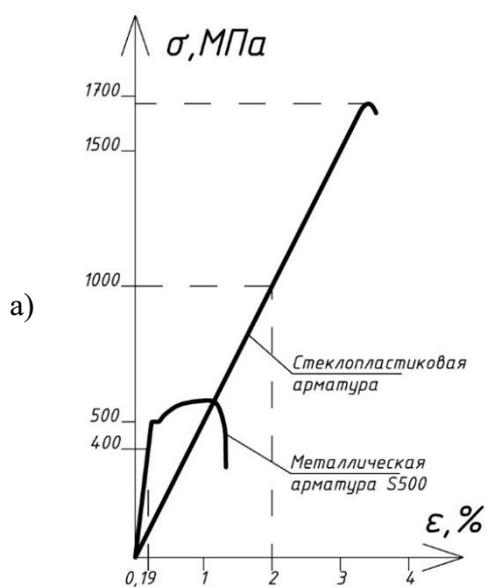


Рисунок 8 – Испытание стеклопластикового арматурного стержня на растяжение:
а – диаграмма напряжённо-деформированного состояния; б – общий вид арматуры после разрушения

Проведение испытания металлической арматуры

Испытание образцов арматуры проводится в соответствии с ГОСТ 12004-81

Перед испытанием определяют начальную рабочую длину образца l_0 и площадь поперечного сечения A_s .

Нагружение образца ведут ступенями. Каждая ступень должна составлять не более 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки. После каждой ступени нагружения образец выдерживается под нагрузкой не менее 10 секунд. Во время испытания фиксируются значения нагрузки создаваемой прессом N_i и удлинение образца Δl_i .

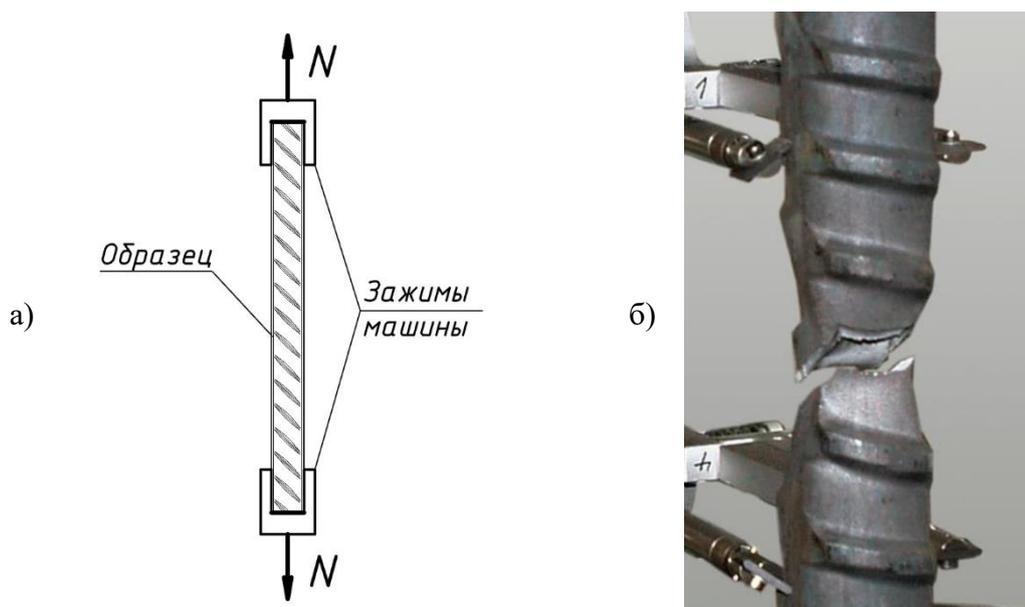


Рисунок 9 – Испытание металлического арматурного стержня на растяжение:
а – схема испытания; б – место разрыва арматуры

Обработка результатов испытания

По данным полученным в результате испытания мягкой арматурной стали строится график $N(\Delta l)$.

На графике необходимо обозначить следующие критические нагрузки:

- усилие, соответствующее пределу упругости N_{el} ;
- усилие, соответствующее пределу текучести N_y ;
- максимальное усилие перед разрывом N_u .

Вычисляем предел упругости:

$$f_{el} = \frac{N_{el}}{A_s}, \text{ МПа}$$

Вычисляем предел текучести:

$$f_y = \frac{N_y}{A_s}, \text{ МПа}$$

Вычисляем временное сопротивление:

$$f_u = \frac{N_u}{A_s}, \text{ МПа}$$

Нормативное сопротивление арматуры f_{yk} получается по результатам серии испытаний. Результаты испытаний обрабатываются методами математической статистики (см. Лабораторная работа № 2). Нормативные значения получаются с односторонней гарантированной обеспеченностью 95%.

Значение f_{yk} в результате каждого испытания принимают равными наименьшему контролируемому значению:

– для стержневой арматуры, высокопрочной проволоки и арматурных канатов – физическому пределу текучести f_y или условному пределу текучести $f_{0,2}$;

– для обыкновенной арматурной проволоки – условному пределу текучести $f_{0,2} = 0,75 \cdot f_u$.

Расчетное сопротивление арматуры растяжению вычисляют делением нормативного сопротивления на соответствующий коэффициент по безопасности:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ МПа}$$

где γ_s – коэффициент безопасности для арматурных сталей. В соответствии с СНБ 5.03.01-02 принимается равным:

1,10 – для арматуры классов S240 и S400;

1,15 – для арматуры диаметром 6–22 мм класса S500;

1,20 – для арматуры диаметром 4–5 мм и 25–40 мм класса S500;

1,20 – для преднапрягаемой арматуры.

Модуль упругости арматурной стали вычисляется по формуле:

$$E_s = \frac{f_{el}}{\varepsilon_{el}}, \text{ МПа}$$

где ε_{el} – относительное удлинение при достижении предела упругости f_{el} , вычисляется по формуле $\varepsilon_{el} = \frac{(\Delta l_{el})}{l_0}$, мм/м. l_0 примем равным 100 мм.

Определяем предел упругости f_{el} , предел текучести f_y , временное сопротивление f_u , нормативное f_{sk} и расчётное f_{yd} сопротивления, модуль упругости E_s .

На графике необходимо обозначить нагрузку N_{yd} , при которой арматура достигает предела расчётного сопротивления f_{yd} . $N_{yd} = \frac{f_{yd}}{A_s}$.

Аналогично по данным полученным в результате испытания твёрдой арматурной стали может быть построен график $N(\Delta l)$ и определены значения усилий, соответствующих условному пределу упругости $N_{0,02}$ и условному пределу текучести $N_{0,2}$.

Условный предел упругости вычисляется по формуле:

$$f_{0,02} = \frac{N_{0,02}}{A_s}, \text{ МПа}$$

Условный предел текучести вычисляется по формуле:

$$f_{0,2} = \frac{N_{0,2}}{A_s}, \text{ МПа}$$

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить нормативное и расчётное значения сопротивления арматуры растяжению и значение модуля упругости арматуры.

Контрольные вопросы:

1. Опишите классификацию арматурной стали по прочности, диаметру проката, наличию площадки текучести, способу изготовления.
2. Опишите классификацию арматурной стали по способу применения, форме поверхности, по виду поставки.
3. Опишите основные виды поперечных профилей арматуры. С какими видами поперечного профиля изготавливаются различные классы арматуры?
4. Опишите диаграммы напряжённно-деформированного состояния твёрдых и мягких арматурных сталей. Дайте определение характерным точкам обеих диаграмм. Как получают твёрдые арматурные стали?
5. Опишите особенности, преимущества и недостатки стеклопластиковой арматуры.
6. Как определяется нормативное и расчётное сопротивление и модуль упругости мягкой арматурной стали?
7. Как определяется нормативное и расчётное сопротивление и модуль упругости твёрдой арматурной стали?

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ И РАСЧЁТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА

Цель работы: Изучить порядок определения кубиковых и призмочных прочностей бетона, модуля упругости и модуля деформации бетона.

Задачи работы:

- *определить кубиковую прочность бетона при испытании на сжатие;*
- *построить гистограмму распределения экспериментальных данных;*
- *определить марку и класс бетона при испытании на сжатие;*
- *определить расчётное и нормативное сопротивление бетона;*
- *изучить особенности начального модуля упругости и модуля деформации бетона;*
- *определить расчётный модуль упругости бетона.*

Определение прочностных характеристик бетона

Порядок определения прочностных характеристик бетона регламентирует ГОСТ 10180.

Кубиковая прочность бетона на сжатие нормируется по результатам испытания серии образцов размером 150x150x150 мм (рис 1). Однако на практике также используют кубики с гранью размером 100 и 70 мм. При испытании на сжатие фиксируется разрушающая нагрузка $N_{u,i}$. После чего вычисляется значение кубиковой прочности по результатам каждого испытания:

$$f_{c,cube i} = \alpha \cdot \frac{N_{u,i}}{A}, \text{ МПа}$$

где A – площадь поперечного сечения образца, мм²;
 α – масштабный коэффициент, принимается равным:
для кубиков с гранью 70 мм $\alpha = 0,85$;
для кубиков с гранью 100 мм $\alpha = 0,95$;
для кубиков с гранью 150 мм $\alpha = 1,00$.

Как ни парадоксально, при испытании бетона на сжатие образец разрушается от растягивающих внутренних усилий. При сжатии бетонный образец как бы «расползается» в стороны. Прочность бетона на растяжение приблизительно в 10 раз меньше чем на сжатие, из-за чего боковые участки образца начинают отслаиваться в стороны от центрального. Препятствуют этому силы трения между образцом и плитами пресса. Усилия от трения распространяются вглубь образца под углом α . Именно поэтому остатки образца после разрушения имеют форму двух пирамид.

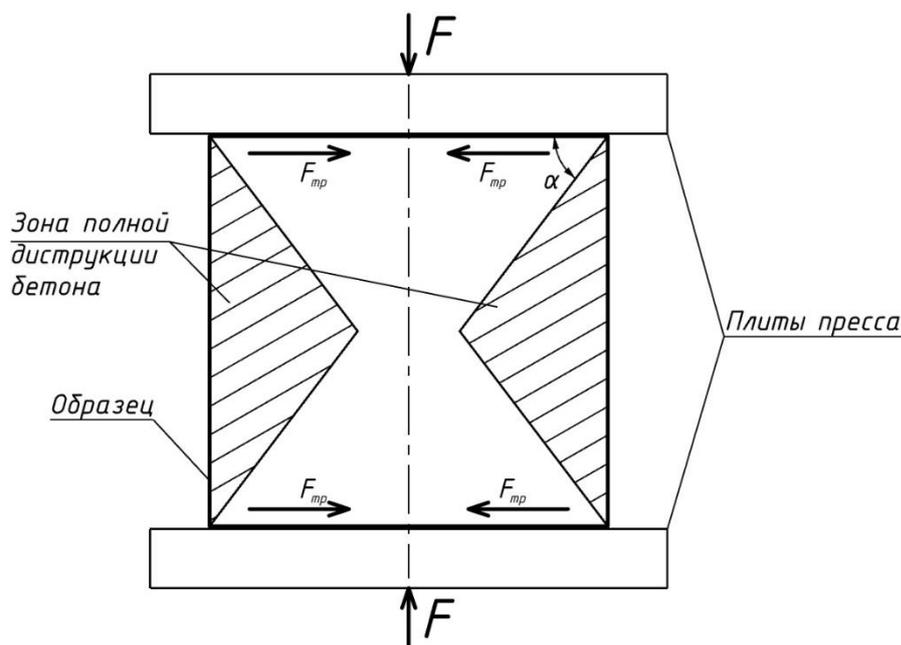


Рисунок 1 – Схема испытания бетонного кубика на сжатие: $F_{тр}$ – сила трения на границе соприкосновения образца и плиты пресса, удерживающая бетон от разрушения

По результатам испытания образцов полученные значения прочности $f_{c,cube i}$ обрабатывают с использованием методов математической статистики.

Детальную статистическую обработку экспериментальных данных мы уже выполняли с вами в лабораторной работе №2, поэтому, если вы что-то забыли обратитесь к странице 12 настоящего пособия.

Вычисляем среднее значение кубиковой прочности бетона $f_{cm,cube}$:

$$f_{cm,cube} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,cube i}}{n}, \text{ МПа}$$

Вычисляем среднеквадратическое отклонение s :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta f_{c,cube i})^2}{n - 1}}, \text{ МПа}$$

Таблица 1 – исходные данные для построения гистограммы распределения

Интервалы в общем виде	от $f_{cm,cube} - 2s$ до $f_{cm,cube} - s$	от $f_{cm,cube} - s$ до $f_{cm,cube}$	от $f_{cm,cube}$ до $f_{cm,cube} + s$	от $f_{cm,cube} + s$ до $f_{cm,cube} + 2s$
Численные значения интервалов				
Количество значений попавших в интервалы, n_x				

Строим гистограмму распределения экспериментальных данных (рис. 2).

При выборе бетона для проектирования конструкций одно из решающих значений имеет Класс бетона по прочности. Ранее пользовались понятием среднего значения прочности – Маркой бетона по прочности.

Марка бетона – среднее значение кубиковой прочности бетона, определяется с гарантированной обеспеченностью в **P = 50%**. Пример обозначения **M400** (400 кгс/см² – кубиковая прочность).

Также существуют марки бетона по водонепроницаемости и по морозостойкости, их не следует путать с маркой по прочности.

Класс бетона – количественная величина, характеризующая качество бетона, определяется с гарантированной обеспеченностью в **P = 95%**.

Сегодня можно встретить как старое обозначение класса бетона **B30** (30 МПа – $f_{c, cube}^G$ – кубиковая прочность), так и новое **C25/30** (25 МПа – f_{ck} – призмная прочность, 30 МПа – $f_{c, cube}^G$ – кубиковая прочность).

Вычисляем коэффициент вариации:

$$V = \frac{s}{f_{cm, cube}}$$

Значение гарантированной кубиковой прочности бетона вычисляется по формуле:

$$f_{c, cube}^G = f_{cm, cube} \cdot (1 - t_{\alpha} V), \text{ МПа}$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента, зависящий от количества измерений и доверительной вероятности, для **односторонней** критической области принимается:

При вычислении гарантированной кубиковой прочности по упрощённой методике допускается применять коэффициенты Стьюдента как для большого количества измерений:

при доверительной вероятности P = 90% $t_{\alpha} = 1,282$;

при доверительной вероятности **P = 95%** $t_{\alpha} = 1,645$, принимаем;

при доверительной вероятности P = 99% $t_{\alpha} = 2,326$.

Нормативная призмная прочность бетона при осевом сжатии может быть приблизительно вычислена по формуле:

$$f_{ck} = f_{c, cube}^G \cdot 0,8, \text{ МПа}$$

При испытании призмных образцов разрушающая нагрузка, а значит и прочность, приблизительно на 20% ниже, чем при испытании кубических образцов. Это обусловлено тем что из-за относительной высоты образца в зоне разрушения призмы силы трения о поверхности плит пресса практически полностью теряют своё влияние.

По результатам расчёта определяем класс бетона C.../...

Вычисляем расчётную прочность бетона:

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c, \text{ МПа}$$

где γ_c – коэффициент безопасности для бетона. В соответствии с СНБ 5.03.01-02 для железобетонных конструкций принимается равным 1,5.

На гистограмме **численно** откладываем полученные значения $f_{cm, cube}$, $f_{c, cube}^G$, f_{ck} и f_{cd} .

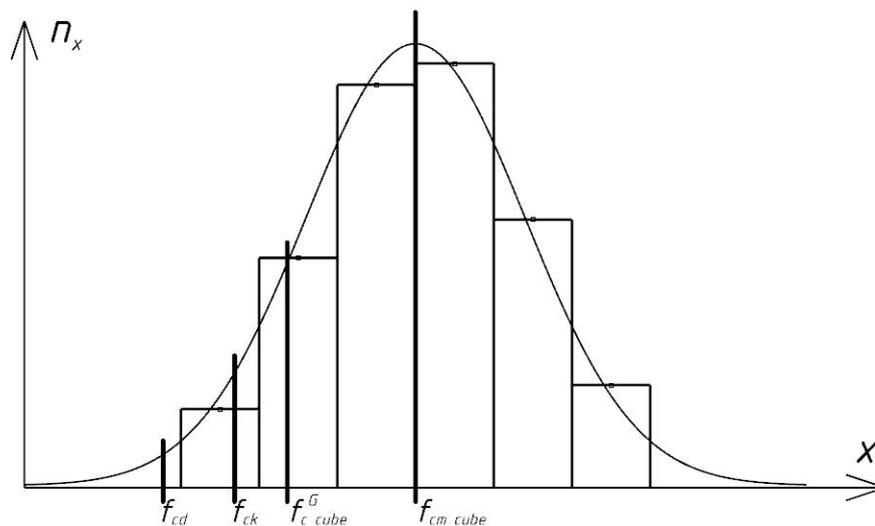


Рисунок 2 – гистограмма распределения экспериментальных значений прочностей бетона

Среднюю прочность бетона на растяжение при изгибе можно приблизительно вычислить по формуле:

$$f_{ctm} = 0,23 \cdot \sqrt[3]{f_{cm, cube}^2}, \text{ МПа}$$

Определение жёсткостных характеристик бетона

Порядок определения жёсткостных характеристик бетона регламентирует ГОСТ 24452.

Модуль упругости бетона при сжатии нормируется по результатам испытания призм размером 150x150x600 мм (рис.3).

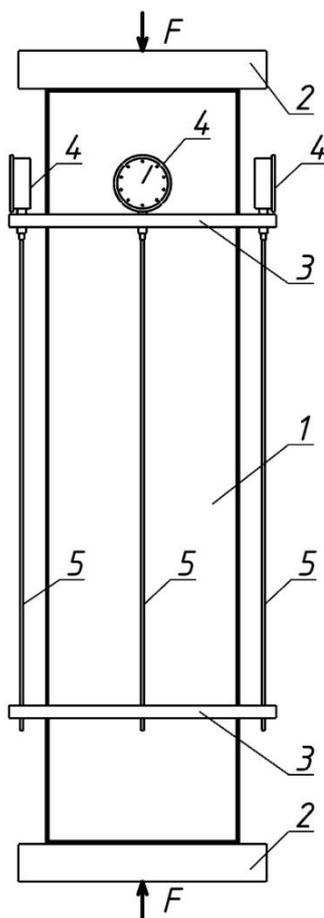


Рисунок 3 – Схема испытания бетонной призмы на сжатие:
1 – образец; 2 – плиты пресса; 3 – Рамки для крепления индикаторов;
4 – индикаторы; 5 – спицы (удлинители баз)

При испытании образца в форме призмы вокруг него устанавливается четыре индикатора на каждой грани призмы. Дело в том, что верхняя и нижняя грани призмы не всегда идеально параллельны, кроме того, идеально установить образец по центру пластин пресса (по оси приложения нагрузки) практически невозможно. При сжатии призмы всегда будет возникать эксцентриситет. Поэтому при испытании показания индикаторов немного отличаются друг от друга, а для анализа принимается среднее значение по всем трём индикаторам. За базу измерения при определении относительных деформаций в данном случае принимается расстояние между рамками для крепления индикаторов (позиция 3 на рисунке 3).

Бетон, как материал, всегда имеет в своём составе огромное количество микропор. Вокруг микропор образуются концентрации напряжений, что вызывает локальные микроразрушения внутри структуры бетона (рис. 4а).

Из-за того, что в процессе сжатия бетонной призмы внутри неё постоянно происходят локальные разрушения, график напряжённо-деформированного состояния

бетона $\sigma(\varepsilon)$ не имеет выраженного прямолинейного участка (рис. 4б), как это наблюдалось, например, в металле. Поэтому для определения деформативных характеристик бетона вводятся понятия начального модуля упругости, модуля полной деформации и расчётного модуля упругости.

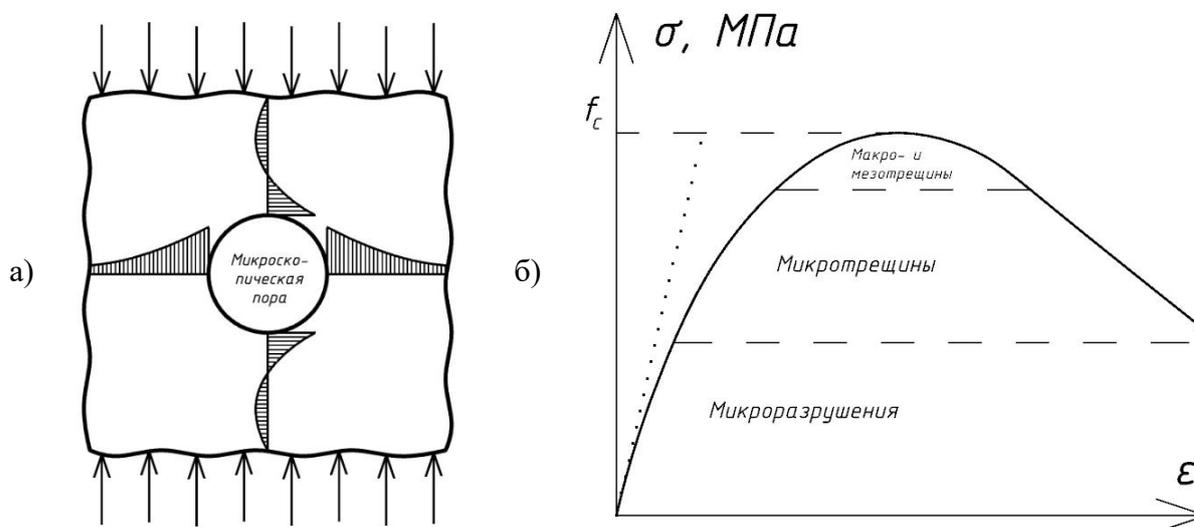


Рисунок 4 – Микроразрушения в бетоне при сжатии: а – концентрации напряжений вокруг микропор, б – диаграмма состояния бетона по О. Я. Бергу

Начальный модуль упругости определяется как тангенс угла наклона касательной к началу диаграммы $\sigma(\varepsilon)$. Также он может быть приблизительно вычислен по формуле:

$$E_{c0} = 43000 \cdot f_{cm,cube} / (21 + f_{cm,cube}), \text{ МПа}$$

Вычисляем начальный модуль упругости по значениям, полученным в результате испытания кубических образцов.

Модуль полной деформации имеет переменное значение и определяется как тангенс угла наклона касательной в каждой точке диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ или как первая производная:

$$E_c = d\sigma/d\varepsilon, \text{ МПа}$$

Расчётный модуль упругости, в соответствии с СНБ 5.03.01-02 принимается как тангенс угла наклона секущей в точке диаграммы $\sigma(\varepsilon)$, которая соответствует значению напряжения равному 40% от прочности бетона f_c или средней прочности бетона f_{cm} (при серии испытаний):

$$E_{cm} = 0,4 \cdot f_{cm} / \varepsilon_{0,4f_{cm}}, \text{ МПа}$$

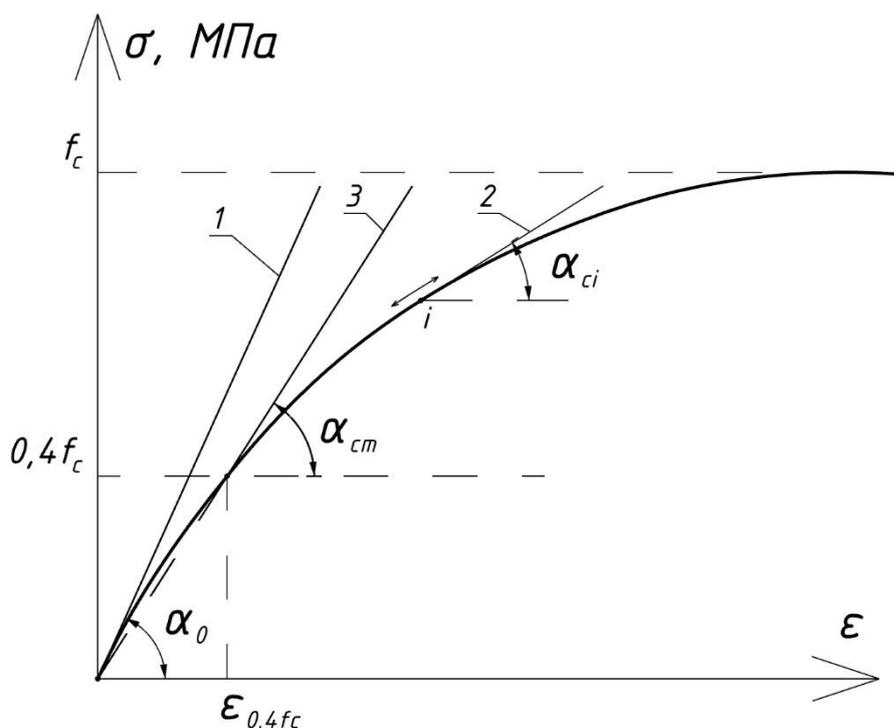


Рисунок 5 – Диаграмма $\sigma(\epsilon)$ полученная при испытании образца в форме призмы:
 1 – касательная для определения начального модуля упругости;
 2 – плавающая касательная для определения полного модуля деформации;
 3 – секущая для определения расчётного модуля упругости

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить значение средней прочности бетона на сжатие и растяжение, указать класс бетона, а также расчётное значение прочности бетона и значение начального модуля упругости.

Контрольные вопросы:

1. Какие формы и размеры образцов используются для опытного определения прочностных и жесткостных характеристик бетона?
2. Дайте определение классу и марке бетона. Как они связаны с испытаниями и понятием доверительной вероятности?
3. Как определяется класс бетона, как маркируется? Опишите на примере выполненной вами работы.
4. Как определяется нормативное и расчётное значение кубиковой прочности бетона?
5. Объясните принципы построения гистограммы распределения экспериментальных значений прочностей бетона. Охарактеризуйте критические прочности, которые вы обозначили на гистограмме.
6. Опишите схему испытания бетонной призмы. Объясните специфику установки измерительных средств.
7. Объясните почему диаграмма напряжённо-деформированного состояния бетона не имеет прямого участка в начале. Дайте определение начального модуля упругости, модуля полной деформации и расчётного модуля упругости. Чем они отличаются и как определяются.

Лабораторная работа № 8

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО СЕЧЕНИЮ НОРМАЛЬНОМУ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ

Цель работы: Изучить напряжённно-деформированное состояние железобетонной балки на всех стадиях её работы, включая стадию разрушения по сечению нормальному к продольной оси элемента.

Задачи работы:

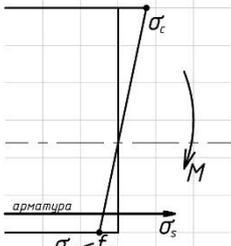
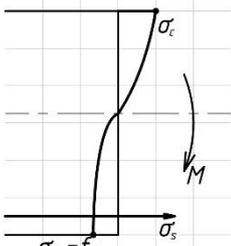
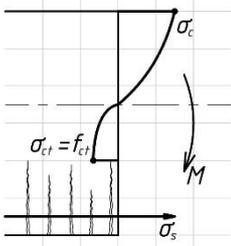
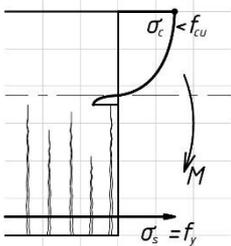
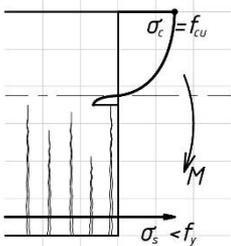
- *изучить стадии напряжённно-деформированного состояния железобетонной балки;*
- *ознакомиться со схемой испытания балки;*
- *ознакомиться с характером деформации и разрушения балки;*
- *определить опытный и расчётный прогиб балки в середине пролёта;*
- *определить опытный и расчётный изгибающий момент появления первых трещин;*
- *определить опытный и расчётный разрушающий изгибающий момент;*
- *сравнить опытные и расчётные значения.*

Теория сопротивления железобетона строится на опытных данных и на законах механики и исходит из действительного напряженно-деформированного состояния конструкции на различных стадиях её нагружения.

При испытании железобетонной балки на изгиб по мере увеличения нагрузки поперечное сечение поочерёдно достигает предельных значений I, II и III классов напряжённно-деформированного состояния (НДС). Различают также стадию Ia и два варианта разрушения балки на III стадии.

- Стадия I – Упругая работа сечения до появления трещин;
- Стадия Ia – Упруго-пластическая работа сечения до появления трещин (Конечный этап стадии I);
- Стадия II – Появление и развитие трещин в растянутой зоне бетона;
- Стадия III – Разрушение элемента.

Таблица 1 – Очередность развития стадий НДС в железобетонной балке

№	Эпюры нормальных напряжений	Описание
I		<p>напряжения в растянутой зоне имеют значения меньше чем предел прочности бетона на растяжение. Растягивающие усилия в нижней части балки воспринимаются бетоном и арматурой совместно. Работа балки считается упругой. Эпюры сжатой и растянутой зоны близки по форме к треугольным</p>
IA		<p>с увеличением нагрузки напряжения в бетоне растянутой зоны сечения быстро достигают предела прочности бетона на растяжение. При этом в растянутой зоне сечения развиваются пластические деформации, а в сжатой зоне бетон продолжает испытывать преимущественно упругие деформации. Эпюра растянутой зоны бетона близка к прямоугольной. Эпюра сжатой зоны – к треугольной</p>
II		<p>появление трещин в растянутой зоне бетона. По мере развития трещин бетон растянутой зоны начинает выключаться из работы. Растягивающее усилие в нижней части балки воспринимается преимущественно арматурой</p>
III*		<p>первой предельно допустимых напряжений достигает арматура. Разрушение носит пластический характер (нормально армированное сечение). При дальнейшем нагружении балки, арматура преодолевает предел текучести и продолжает растягиваться. В определённый момент нагружения сжатая зона бетона достигает предела прочности на сжатие, и балка разрушается окончательно</p>
		<p>первым предельно допустимых напряжений достигает бетон сжатой зоны. Разрушение носит хрупкий характер (сечение переармировано). Наиболее опасный вид разрушения в виду моментальности его наступления</p>

* - Характер разрушения нормального сечения при достижении стадии III зависит от величины армирования сечения.

Проведение испытания

Перед началом испытания необходимо провести обследование балки:

- определить геометрические характеристики испытываемой балки и зафиксировать их в таблице 2;
- убедиться в правильности установки и работы измерительного оборудования;
- оценить соответствие расчётной схемы балки её фактическому закреплению на установке;
- выявить наличие дефектов.

Таблица 2 – Геометрические размеры и армирование балки

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Численное значение
Высота сечения	h	мм	
Ширина сечения	b	мм	
Длина балки	l	мм	
Расчётный пролёт балки	l_0	мм	
Диаметр арматуры в растянутой зоне	\varnothing	мм	
Площадь поперечного сечения арматуры в растянутой зоне	A_s	мм ²	
Защитный слой арматуры в растянутой зоне	c	мм	

Испытательный стенд представляет собой основание с двумя шарнирными опорами, одна из которых подвижна. На стенде закреплена железобетонная балка прямоугольного сечения. В центре пролёта установлен прогибомер, также прогибомеры устанавливаются над узлами опирания по концам балки (рис. 2). Расположенные над опорами прогибомеры позволяют учесть вертикальные перемещения от деформаций узлов опирания.

Нагружение балки происходит при помощи домкрата. Нагрузка от домкрата при помощи стальной траверсы делится пополам и перераспределяется на две точки.

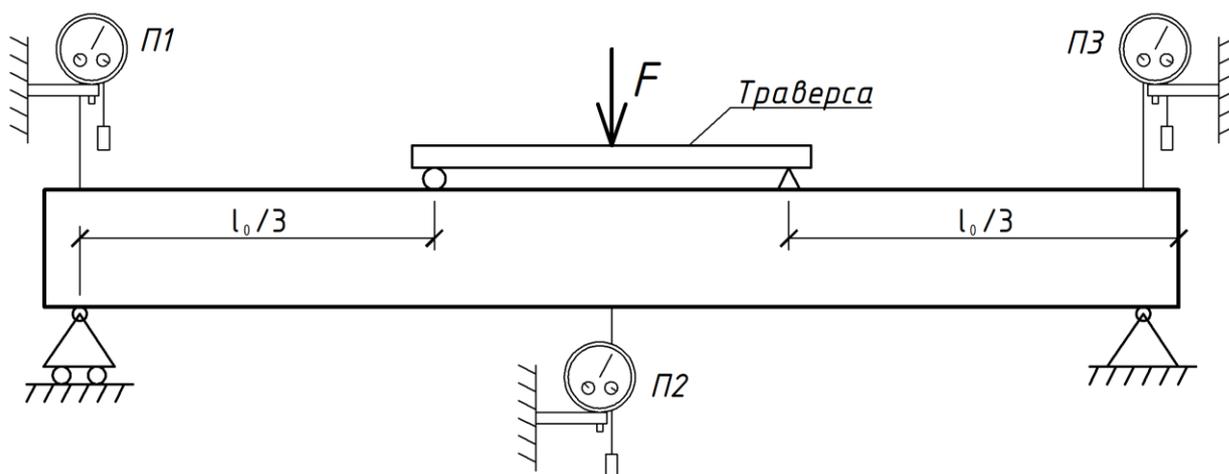


Рисунок 1 – Схема испытания балки

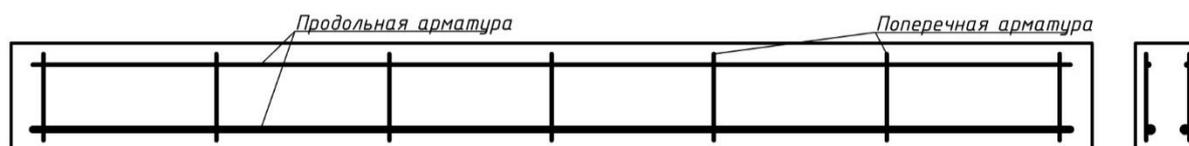


Рисунок 2 – Схема армирования балки

Нагрузка на балку прикладывается ступенями. Приращения нагрузок на каждом этапе не должны превышать 0,10 ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени нагружения снимаются отсчеты по приборам и фиксируется динамика развития трещин.

Опытное значение прогиба балки в середине пролёта вычисляется по формуле:

$$\vartheta_{\text{оп}} = \Delta_2 - \frac{\Delta_1 + \Delta_3}{2}, \text{ мм}$$

где Δ – разница показаний по прогибомерам до и после нагружения, мм.

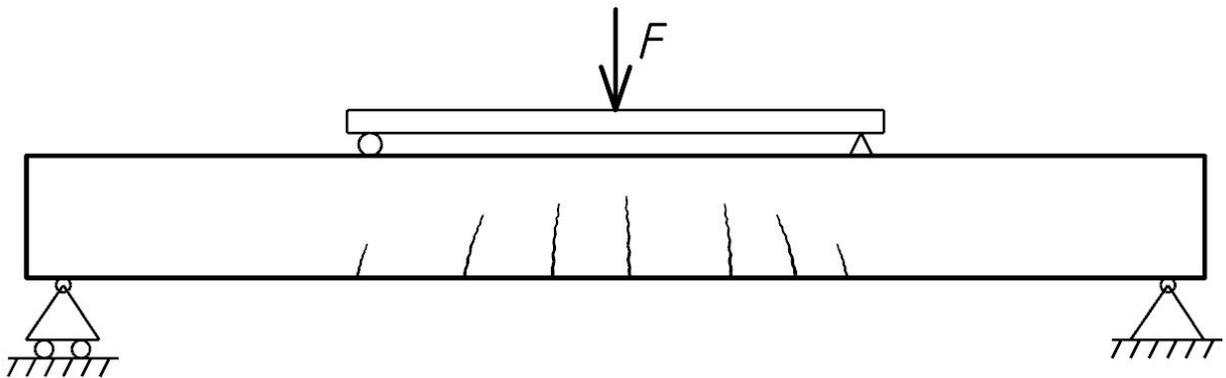


Рисунок 3 – Схема образования силовых трещин в растянутой зоне бетона

Опытный критический изгибающий момент образования трещин в растянутой зоне вычисляется по формуле:

$$M_{cr, \text{оп}} = \frac{F_{cr} \cdot l_0}{6}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

где F_{cr} – нагрузка передаваемая домкратом на балку в момент фиксации появления первых трещин в растянутой зоне бетона, Н.

Опытный разрушающий изгибающий момент:

$$M_{u, \text{оп}} = \frac{F_u \cdot l_0}{6}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

где F_u – максимальная нагрузка передаваемая домкратом на балку в момент её разрушения, Н.

Определение расчётных значений прогибов и критических изгибающих моментов

Для того чтобы вычислить расчётное значение прогиба балки на I стадии НДС (до образования трещин) необходимо вычислить момент инерции приведённого сечения, коэффициент приведения площади сечения и расстояние от верхней грани балки до центра тяжести приведённого сечения:

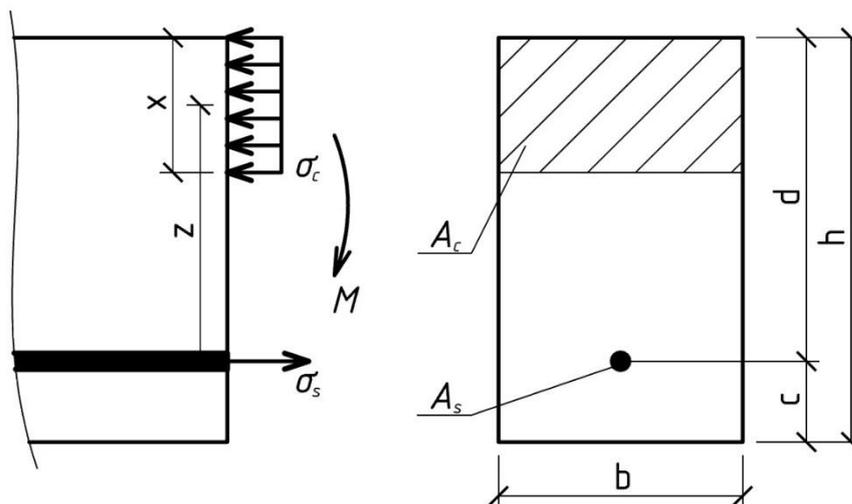


Рисунок 4 – Расчётная схема поперечного сечения балки

Коэффициент приведения площади сечения вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{c0}}$$

где E_s – модуль упругости арматурной стали (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №6), МПа;
 E_{c0} – начальный модуль упругости бетона (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №7), МПа.

Расстояние от верхней грани балки до центра тяжести приведённого сечения вычисляется по формуле:

$$x_1 = \frac{0,5 \cdot b \cdot h^2 + \alpha \cdot A_s \cdot d}{b \cdot h + A_s}, \text{ мм}$$

где d – расстояние от верха балки до оси арматуры в растянутой зоне, мм;

Рассчитываем приведённый к одному материалу момент инерции сечения балки:

$$I_{red} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (x_1 - 0,5 \cdot h)^2 + \alpha \cdot A_s \cdot (d - x_1)^2, \text{ мм}^4$$

Методика расчёта такова, что арматурный стержень как бы заменяется эквивалентной по жёсткости (приведённой) площадью бетона. При этом центр тяжести приведённой площади бетона располагается в том же месте где и арматура. В формуле приведённого момента инерции третье слагаемое и есть учёт этого приведённого сечения бетона.

Расчётный прогиб балки на I стадии НДС (до образования трещин) может быть вычислен по формуле:

$$\vartheta_p = s \cdot \frac{M \cdot l_0^2}{0,85 \cdot E_{c0} \cdot I_{red}}, \text{ мм}$$

- где 0,85 – коэффициент, учитывающий влияние кратковременной ползучести бетона;
 s – коэффициент, зависящий от условий опирания балки и схемы нагружения, в нашем случае принимается равным $\frac{23}{216}$;
 M – изгибающий момент действующий на балку, вычисляется по формуле $M = \frac{F \cdot l_0}{3 \cdot 2}$, Н · м.

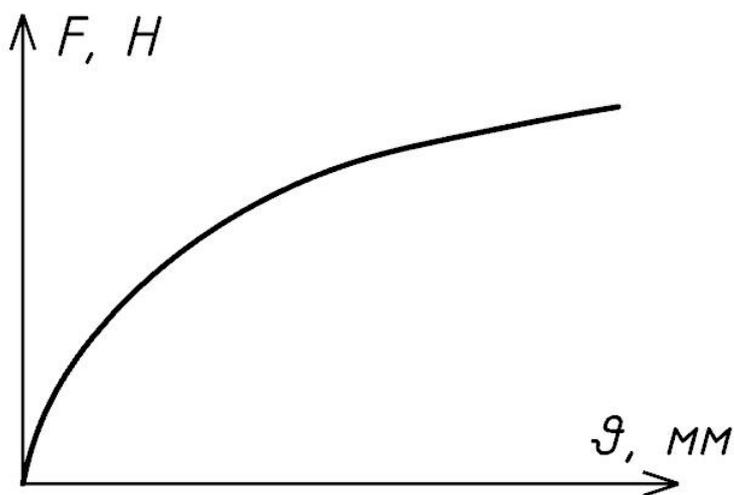


Рисунок 5 – Принципиальная диаграмма зависимости прогиба балки от прилагаемой нагрузки

Для того чтобы вычислить расчётное значение изгибающего момента при достижении которого начинается образование трещин в растянутой зоне бетона, необходимо вычислить момент сопротивления приведенного сечения и упруго-пластический момент сопротивления сечения балки:

Момент сопротивления приведенного сечения по крайнему растянутому волокну балки вычисляется по формуле:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{h - x_1}, \text{ мм}^3$$

Упруго-пластический момент сопротивления прямоугольного сечения по крайнему растянутому волокну балки вычисляется по формуле:

$$W_{pl} = 1,75 \cdot W_{red}, \text{ мм}^3$$

Расчётный изгибающий момент при достижении которого начинается **образование трещин** в растянутой зоне бетона вычисляется по формуле:

$$M_{cr,p} = f_{ctm} \cdot W_{pl}$$

где f_{ctm} – средняя прочность бетона на растяжение, МПа (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №7).

Для того чтобы вычислить расчётное значение изгибающего момента при достижении которого происходит разрушение балки, необходимо вычислить высоту сжатой зоны бетона:

Высота сжатой зоны бетона вычисляется по формуле, мм:

$$x = \frac{f_y \cdot A_s}{f_{cm} \cdot b}, \text{ мм}$$

Расчётный изгибающий момент при достижении которого происходит **разрушение балки** вычисляется по формуле:

$$M_{u,p} = f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot \left(d - \frac{x}{2}\right), \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона на сжатие, МПа (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №7).

Для того чтобы лучше понять величину критических нагрузок вычислим их значения в килограммах:

$$F_{cr,p} = \frac{M_{cr,p} \cdot 6}{l_0} = _, \text{ Н} = _, \text{ кг}$$

$$F_{u,p} = \frac{M_{u,p} \cdot 6}{l_0} = _, \text{ Н} = _, \text{ кг}$$

*В **выводе** необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить расчётное значение прогиба балки при заданной нагрузке и значения критических нагрузок образования трещин и разрушения балки.*

Контрольные вопросы:

1. Опишите порядок и принцип развития напряжений в поперечном сечении железобетонной балки на всех стадиях напряжённо-деформированного состояния.
2. Опишите испытательную установку и расположение измерительных средств на ней.
3. Опишите порядок нагружения балки и порядок фиксации и обработки показаний измерительных средств.
4. Опишите порядок определения расчётного прогиба балки на примере выполненной вами работы.
5. Опишите порядок определения критических изгибающих моментов на примере выполненной вами работы.
6. Какие величины критических нагрузок вы получили? Объясните, что будет происходить с испытываемой балкой, в случае её нагружения полученными вами нагрузками.

Лабораторная работа № 9

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО СЕЧЕНИЮ НАКЛОННОМУ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ

Цель работы: Изучить напряжённо-деформированное состояние железобетонной балки на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения по сечению наклонному к продольной оси элемента.

Задачи работы:

- ознакомиться со схемой испытания балки;
- ознакомиться с характером деформации и разрушения балки;
- определить опытное и расчётное значение разрушающей нагрузки;
- сравнить опытные и расчётные значения.

При испытании железобетонной балки на изгиб, помимо разрушения от действия изгибающего момента в центре балки (см. Лабораторная работа №8), может также произойти разрушение от действия поперечного усилия в приопорной зоне балки (рис. 1). При увеличении нагрузки в приопорных зонах раскрывается одна или несколько наклонных трещин. Разрушение балки может произойти либо по сжатой зоне бетона над трещиной, либо от разрушения вертикально установленной арматуры. В этой работе мы рассмотрим второй случай разрушения.

Для второго случая, при дальнейшем нагружении балки, напряжения в вертикально расположенной арматуре могут преодолеть временное сопротивление от чего произойдёт окончательное разрушение балки.

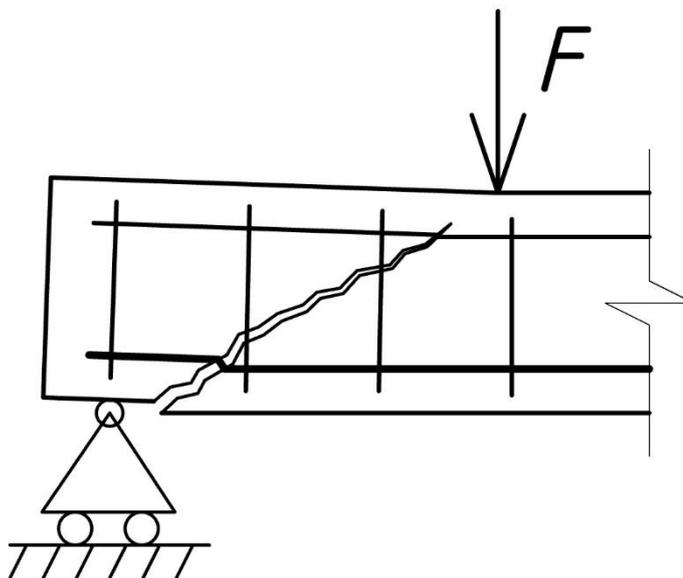


Рисунок 1 – Схема разрушения приопорного участка балки от действия поперечного усилия

Проведение испытания

Перед началом испытания необходимо провести обследование балки:

- определить геометрические характеристики испытываемой балки и зафиксировать их в таблице 1;
- убедиться в правильности установки и работы измерительного оборудования;
- оценить соответствие расчётной схемы балки её фактическому креплению на установке;
- выявить наличие дефектов.

Таблица 1 – Геометрические размеры и армирование балки

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Численное значение
Высота сечения	h	мм	
Ширина сечения	b	мм	
Длина балки	l	мм	
Расчётный пролёт балки	l_0	мм	
Защитный слой арматуры в растянутой зоне	c	мм	
Диаметр вертикально установленной поперечной арматуры	\varnothing	мм	
Площадь сечения поперечной арматуры	A_{sw}	мм ²	
Продольный шаг поперечной арматуры	s	мм	

Испытательный стенд представляет собой основание с двумя шарнирными опорами, одна из которых подвижна. На стенде закреплена железобетонная балка прямоугольного сечения. В центре пролёта установлен прогибомер, также прогибомеры устанавливаются над узлами опирания по концам балки (рис. 2). На приопорных участках балки, там, где предполагается её разрушение устанавливается по два тензометра. Базы тензометров T1 и T4 ориентируются по направлению главных сжимающих напряжений. Базы тензометров T2 и T3 – по направлению главных растягивающих напряжений.

Нагружение балки происходит при помощи домкрата. Нагрузка от домкрата при помощи стальной траверсы делится пополам и перераспределяется на две точки.

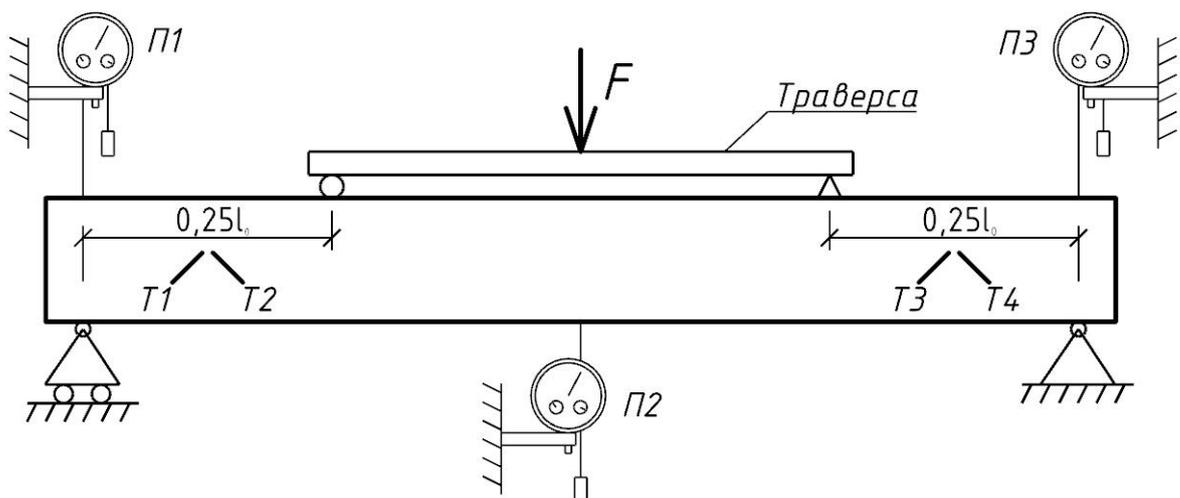


Рисунок 2 – Схема испытания балки

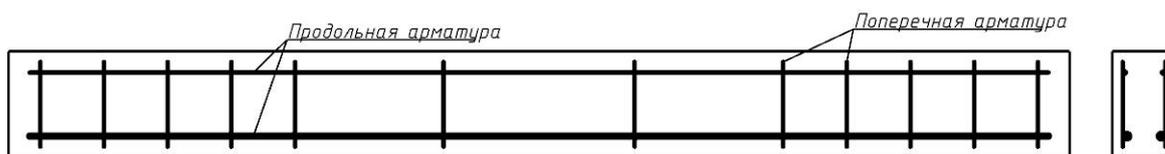


Рисунок 3 – Схема армирования балки

Нагрузка на балку прикладывается ступенями. Приращения нагрузок на каждом этапе не должны превышать 0,10 ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени нагружения снимаются отсчеты по приборам и фиксируется динамика развития трещин.

Опытное значение поперечного разрушающего усилия вычисляется по формуле:

$$V_{оп} = 0,5 \cdot F_u, \text{ кН}$$

где F_u – предельная разрушающая нагрузка на балку, кН.

Определение расчётного значения разрушающей нагрузки

Расчётное разрушающее поперечное усилие вычисляется как сумма предельных усилий, возникающих в бетоне и арматуре рабочей зоны:

$$V_p = V_{cd} + V_{sw}, \text{ кН}$$

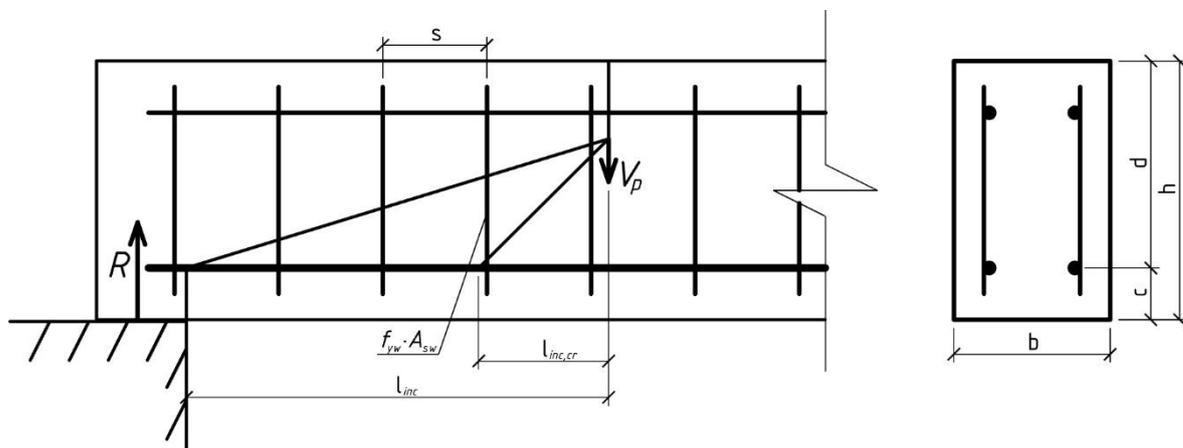


Рисунок 4 – Расчётная схема наклонного сечения балки на припорном участке

При этом предельное разрушающее усилие в бетоне вычисляется по формуле:

$$V_{cd} = \frac{2 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot d^2}{l_{inc}}, \text{ кН}$$

где f_{ctm} – средняя прочность бетона на растяжение, МПа (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №7);
 d – расстояние от верха балки до оси арматуры в растянутой зоне, мм;
 l_{inc} – длина проекции наиболее опасного сечения на продольную ось балки, в нашем случае принимается равной $0,25 \cdot l_0$, мм.

Вычисляется максимальное распределённое усилие, воспринимаемое вертикальной поперечной арматурой:

$$v_{sw} = \frac{2 \cdot f_{yw} \cdot A_{sw}}{s}, \text{ кН/мм}$$

где f_{yw} – предел текучести вертикально установленной поперечной арматуры (принимается по результатам расчёта Лабораторной работы №7).

Для элементов с вертикальной поперечной арматурой, установленной с постоянным шагом в пределах наклонного сечения, принимается по формуле, но не более l_{inc} :

$$l_{inc,cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot d^2}{v_{sw}}}, \text{ мм}$$

Предельное разрушающее усилие в вертикально установленной поперечной арматуре вычисляется по формуле:

$$V_{sw} = v_{sw} \cdot l_{inc,cr}, \text{ кН}$$

Для того чтобы лучше понять величину разрушающей нагрузки вычислим её значение в килограммах:

$$F_{u,p} = V_p \cdot 2 = _, \text{ кН} = _, \text{ кг}$$

В выводе необходимо обобщить изученный в лабораторной работе материал, отразить расчётное значение критической нагрузки, достижение которой приведёт к разрушению балки.

Контрольные вопросы:

1. Опишите принцип разрушения балки по сечению наклонному к продольной оси элемента.
2. Опишите испытательную установку и расположение измерительных средств на ней.
3. Опишите порядок нагружения балки и порядок фиксации показаний измерительных средств.
4. Опишите порядок определения критической разрушающей нагрузки на примере выполненной вами работы.