

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации  
Красноярская Государственная Архитектурно-строительная  
Академия

В.А. Яров, О.П. Медведева, В.И. Колдырев, Л.В. Щербаков.

# **Испытание железобетонных конструкций**

Учебное пособие

Красноярск, 1999

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации  
Красноярская Государственная Архитектурно-строительная  
Академия

В.А. Яров, О.П. Медведева, В.И. Колдырев, Л.В. Щербаков.

## **Испытание железобетонных конструкций**

Учебное пособие по лабораторным работам для студентов  
строительных ВУЗов.

Красноярск, 1999

ББК 38.53  
УДК 624.012.45

Рецензенты: А.М.Болдышев, профессор,  
В.С.Плевков, доцент (Томский государственный  
архитектурно строительный университет)

Испытание железобетонных конструкций: Учебное пособие  
/В.А. Яров; О.П. Медведева; В.И. Колдырев; Л.В. Щербаков - Красно-  
ярск,  
КрасГАСА, 1999.- стр. с илл.

В учебном пособии изложены основные положения по экспериментальной оценке напряженно деформируемого состояния железобетонной конструкции на всех стадиях загрузки. Описаны общие сведения по испытанию строительных конструкций, применению и устройству оборудования, измерительных приборов, по методике проведения испытаний. Дан анализ напряженного состояния элементов работающих на изгиб по нормальному и наклонному сечению и на внецентренное сжатие. Приведены результаты испытаний железобетонных элементов, их обработка и оценка характера разрушения. Пособие адресовано студентам строительных специальностей 290300, 290500, 290600, 291000

Редактор Л. Ф. Калашник  
Подписано в печать 99. Формат 60x84/16  
Бумага тип

Отпечатано на ризографе КрасГАСа  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Железобетон получил широкое применение в капитальном строительстве как в нашей стране, так и в зарубежном. Предпосылками к широкому использованию железобетонных конструкций в строительстве зданий и сооружений являются:

- большие запасы сырья для производства вяжущих и заполнителей;
- простые технологии производства;
- возможность изготовления изделий любой формы.

Он обладает высокой прочностью, долговечностью, огнестойкостью, малыми эксплуатационными расходами.

Из железобетона возводятся гидроэлектростанции, плотины, мосты, башни, спортивные сооружения, большепролетные покрытия, общественные и жилые здания и другие сооружения.

Создание экономичных и надежных в эксплуатации конструкций на основе достижений современной науки и техники - одна из задач инженеров - строителей. Для успешного решения этой задачи необходимы высококвалифицированные инженерные кадры, владеющие современными методами проектирования, изготовления и экспериментальных исследований железобетонных конструкций.

В связи с этим при подготовке специалистов, наряду с изучением теоретических вопросов, необходимо особое внимание уделять приобретению ими практических навыков в решении сложных инженерных задач, умению грамотно подготовить и провести экспериментальные исследования.

Настоящее пособие подготовлено для студентов, обучающихся в строительных вузах по специальностям 2900300, 290500, 290600, 291000 в соответствии с учебной программой по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции».

Учебное пособие содержит: предисловие, введение, три главы, перечень контрольных вопросов и библиографический список.

**Во введении** обосновываются вопросы необходимости исследования напряженно – деформированного состояния железобетонных конструкций, позволяющие сделать оценку несущей способности элементов на стадиях: опытного проектирования эксплуатации, разработки новой конструкции, а также в учебных целях.

**В первой главе** описаны основные сведения по испытанию железобетонных конструкций: планирование, подготовка и испытание конструкций на статические нагрузки. Приведены общие сведения об оборудовании, приборах, измерительной аппаратуре, применяемых при испытании строительных конструкций.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы определения физико – механических характеристик бетона и арматуры. Изложены методики проведения испытаний железобетонных конструкций, обработки экспериментальных данных и определения погрешностей результатов испытаний.

**В третьей главе** изложена методика проведения испытаний основных железобетонных элементов с описанием экспериментальных образцов, установок, приборов, измерительной аппаратуры, используемой в Красноярской государственной архитектурно-строительной академии при выполнении студентами лабораторных работ. Приведены результаты испытания железобетонных балок и колонн, теоретические расчеты железобетонных элементов на изгиб и внецентренное сжатие по двум группам предельных состояний. Дан анализ полученных экспериментальных данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Для повышения надежности возводимых зданий и сооружений, эффективности применяемых материалов и конструкций проводится большой объем экспериментальных исследований. Основной задачей таких исследований является получение реальной картины напряженно - деформированного состояния конструкции и сооружения в целом при различных внешних воздействиях. По своему назначению испытания подразделяются на несколько групп.

**Контрольные испытания** проводятся при серийном изготовлении сборных конструкций на заводах строительной индустрии для массового строительства с целью контроля качества выпускаемой продукции.

**Испытания опытных конструкций** осуществляют для проверки соответствия этих конструкций проектным и нормативным требованиям по несущей способности, жесткости и трещиностойкости перед внедрением их в массовое производство. Такие конструкции испытывают до разрушения, что дает возможность выявить наиболее слабые места, фактические запасы прочности и внести необходимые коррективы.

**Испытания построенных сооружений** производят с целью проверки соответствия их нормативным требованиям. Такие испытания проводятся перед вводом в эксплуатацию ответственных конструкций (пространственных большепролетных покрытий, пролетных строений мостов, спортивных сооружений и других объектов).

**Испытания эксплуатируемых конструкций и сооружений** проводятся для определения их фактической несущей способности, жесткости и трещиностойкости с целью увеличения нагрузки, действующей на конструкции, или выяснения действительного состояния и возможности их дальнейшей эксплуатации.

**Испытания железобетонных конструкций в научных и учебных целях** осуществляют для изучения влияния прочностных характеристик материалов

на несущую способность, деформативность и трещиностойкость конструкции, получения реальной картины работы конструкций и проверки принятых расчетных гипотез. Такие испытания проводят, как правило, в лабораторных условиях на физических моделях, которые имеют размеры меньше, чем оригинал, но сохраняют при этом геометрическое и физическое подобие.

Учебной программой дисциплины "Железобетонные и каменные конструкции" для студентов строительных специальностей предусмотрено проведение следующих лабораторных работ:

1. Испытание железобетонной балки с разрушением по нормальному сечению.
2. Испытание железобетонной балки с разрушением по наклонному сечению.
3. Испытание железобетонной колонны на внецентренное сжатие.
4. Испытание предварительно напряженной железобетонной балки.

Лабораторные работы являются важной частью изучения данной дисциплины, позволяют студентам успешно освоить вопросы расчета, конструирования и методику проведения испытаний железобетонных конструкций.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИИ ЖЕЛЕЗОБЕ- ТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **1.1. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

#### **Испытательная нагрузка**

При проведении статических испытаний загрузка исследуемых конструкций внешней нагрузкой должно осуществляться постепенно, без рывков и ударов, чтобы исключить влияние сил инерции. Необходимо также обеспе-

чивать стабильность нагрузок, их постоянство во времени на протяжении всего периода проведения испытаний.

При испытании конструкций вводится понятие испытательной и контрольной нагрузки. Испытательная нагрузка – это нагрузка, включая собственный вес, которая прикладывается к конструкции в процессе испытания. Контрольной нагрузкой называют предельное значение испытательной нагрузки, по результатам воздействия которой производят оценку качества конструкций.

При проверке жесткости и трещиностойкости конструкций контрольная нагрузка принимается равной нормативной нагрузке, при проверке прочности – контрольной разрушающей нагрузке.

Величина нагрузки и скорость ее приложения при проведении лабораторных и научно-исследовательских работ назначается в соответствии с поставленными целями.

По характеру расположения на конструкциях статические нагрузки делятся на сосредоточенные, распределенные по линии и распределенные по площади.

В качестве нагрузок при статических испытаниях используют штучные грузы, сыпучие материалы, наполняемые водой емкости, пневматические подушки, гидравлические и винтовые домкраты.

Лучшей нагрузкой в отношении простоты определения веса, равномерности распределения ее по горизонтальной плоскости и дешевизны является вода (рис.1.1), но загрузка испытываемых конструкций водой требует дополнительных устройств. Равномерно-распределенная нагрузка при статических испытаниях строительных конструкций может создаваться давлением воздуха, с помощью плоских воздухонепроницаемых мешков ("камер") из клеенки или тонкой резины (рис.1.2). Необходимое давление в камерах создается с помощью компрессора или баллонов со сжатым воздухом.



Для создания сосредоточенных усилий применяются подвесной груз, натяжные приспособления, домкраты. Подвешивание грузов является самым простым способом создания сосредоточенных нагрузок. Преимуществом такого способа является то, что при подвеске грузов действующие усилия не меняются при деформировании строительных конструкций.

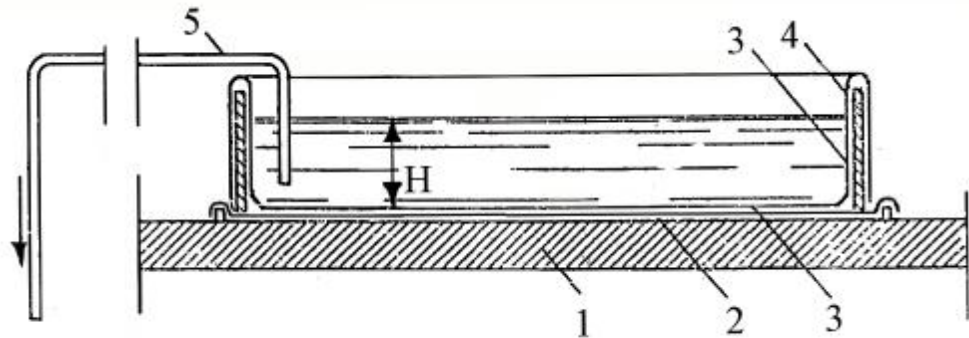
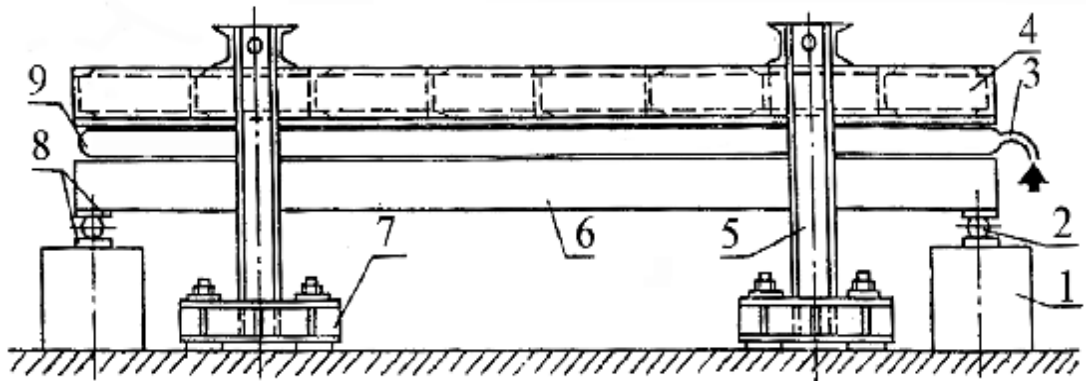


Рис.1.1 Загрузка водой:

1 – испытываемое перекрытие; 2 – подстилающий брезент;  
3 – водонепроницаемая ткань; 4 – ограждения; 5 – сифон

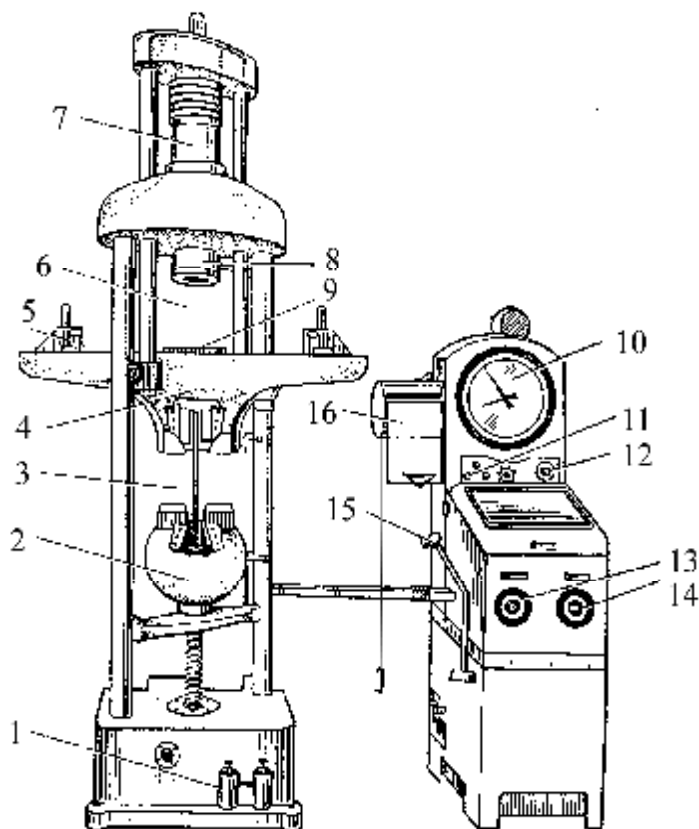
Рис.1.2 Стенд для испытаний плит сжатым воздухом

1 – опора; 2 – каток; 3 – подача сжатого воздуха; 4 – верхний ростверк;  
5 – поперечная рама; 6 – испытываемая конструкция; 7 – анкерная



траверса; 8 – стальные пластинки; 9 – воздушонепроницаемая камера

Наиболее удачным средством приложения сосредоточенных сил являются домкраты. Их преимущества: небольшие габариты, простота создания и регулирования нагрузки, возможность приложения ее по любым требуемым направлениям.



В лабораторных условиях при испытании небольших фрагментов, моделей и образцов материалов применяются стандартное прессовое оборудование, испытательные машины и специальные стелды (рис.1.3, 1.4).

Рис.1.3 Испытательная машина

1 – выключатель для подъема и опускания нижнего захвата; 2 – нижний захват; 3 – пространство для проведения испытаний на растяжение; 4 – гибочный стол, являющийся одновременно верхним захватом; 5 – передвигная опора для испытания на изгиб; 6 - пространство для проведения испытаний на сжатие, продольный изгиб, поперечный изгиб, а также других испытаний; 7 – рабочий цилиндр; 8 – узел крепления гибочного штампа у верхней опорной плиты; 9 – нижняя опорная плита; 10 – шкала визуального наблюдения за показаниями маятникового манометра; 11 – шкала приспособления для поддержания постоянства заданной нагрузки; 12 – кнопки для включения двигателя насоса; 13 – ручной маховичок для включения приспособления для поддержания постоянства заданной нагрузки; 14 – ручной маховичок для точного управления; 15 – рычаг для нагрузки и разгрузки; 16 – самопишущий прибор для записи диаграммы "сила – путь" или "сила – время"

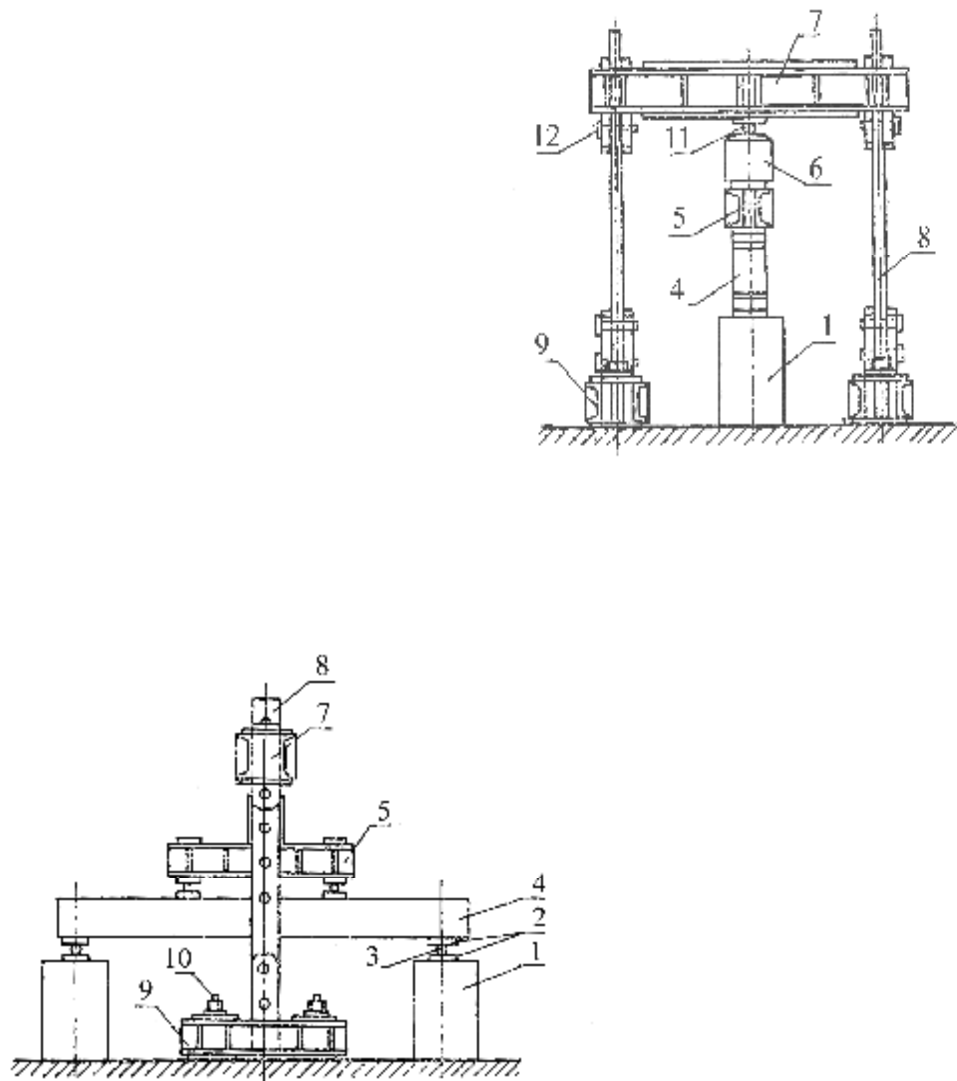


Рис. 1.4 Стенд для испытаний балочных элементов двумя сосредоточенными силами

1 - опоры стенда; 2 - стальные пластинки; 3 - каток; 4 - испытываемая конструкция; 5 - распределительная траверса; 6 - гидравлический домкрат; 7 - поперечная траверса; 8 - заанкеренная стойка; 9 - анкерные траверсы; 10 - анкерные болты; 11 - стальной шар; 12 - штырь.

## 1.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРЕССЫ И МАШИНЫ.

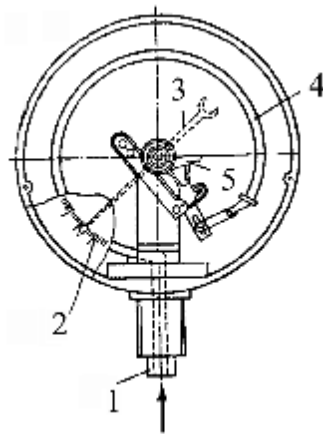
Испытательные прессы и машины являются основным оборудованием испытательных лабораторий железобетонных конструкций. Для испытания строительных конструкций используют машины и прессы, обеспечивающие максимальные усилия от 5 до 80 МН. Если габариты испытываемых конструкций и требуемая величина нагрузки соответствуют возможностям имеющихся машин, то испытания следует проводить именно на этих машинах, а не на менее точных испытательных стендах.

При статических испытаниях строительных образцов и конструкций на сжатие и продольный изгиб используются гидравлические прессы следующих марок: ИПС - 500, ПММ - 500 (с усилием до 5000 кН); ИПС-200, ПММ –200 (с усилием до 2000 кН); ПСУ-125 (с усилием до 1250 кН); 2 ПГ -50, ПСУ-50 (с усилием до 500 кН) и 2 ПГ -10, ПСУ -10 (с усилием до 700 кН).

Для испытания конструкций и материалов на растяжение и сжатие применяются универсальные испытательные машины следующих типов: ГРМ -1 (с максимальным усилием - 500 кН); ГМС -50 (с максимальным усилием -500 кН); Р-5, УМ-5 (с максимальным усилием - 50 кН).

Испытательные машины и прессы используют для испытания строительных конструкций только при наличии паспорта и свидетельства о поверке. Поверка и тарировка испытательных машин и прессов производится не реже одного раза в год, а также после каждого ремонта машины или замены основных деталей.

Если размеры конструкции и требуемые усилия превышают возможности прессового оборудования, испытания железобетонных конструкций приводят на специально изготовленных стендах. Наибольшее распространение получили стационарные стенды для испытания балок, ферм, стеновых панелей, рамных и других конструкций. Такие стенды монтируются на отдельном фундаменте или силовой плите [1] . На рис. 1.4 показан стенд для испытания балочных элементов.



При испытании конструкций на

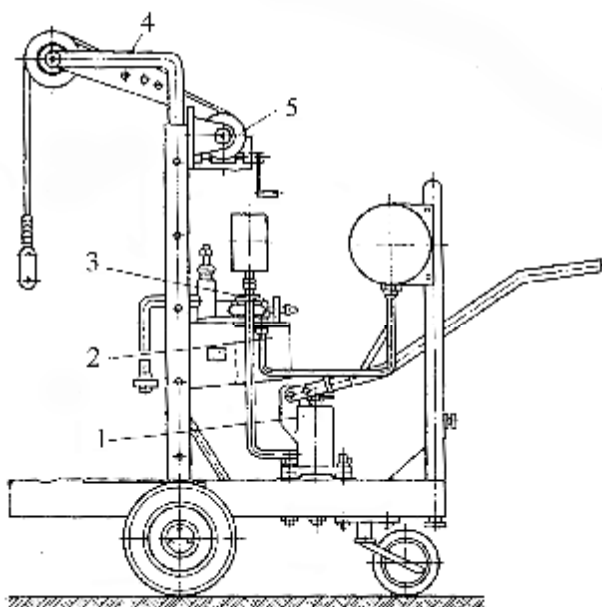
Рис.1.5 Манометр с трубчатой пружиной

стендах используют гидравлические домкраты серий ДГ -100м, ДГ -200м и облегченные гидравлические домкраты ЦНИИСКА грузоподъемностью от 5 до 50 кН. Давление, развиваемое гидравлическими домкратами, измеряют манометрами. При испытаниях конструкций чаще всего применяют манометры с трубчатой пружиной. Эти манометры выпускаются двух классов точности: «2,5» или «4» с предельной ошибкой при измерении не более 2,5% или 4% (рис.1.5).

а) схематичный вид; б) общий вид; 1 – штуцер; 2 – шкала; 3 – стрелка; 4 – трубчатая пружина; 5 – зубчатый сектор

Для нагнетания масла в гидравлические домкраты применяются плун-

Рис. 1.6. Насосная станция НСР- 400 с ручным приводом



1 – насос простого действия;  
2 – масляный бачок; 3 – распределительная коробка на три штуцера с вентилями переключения (пульт управления); 4 – выдвижная стрела; 5 – лебедка для подъема домкрата

жерные насосы и насосные станции с ручным или электрическим приводом (рис.1.6). Насосы соединяют

с домкратом резиновыми шлангами высокого давления. Промышленностью выпускаются следующие типы насосных станций: НСР-400; НСР-400м; НСП-400; НСП-400м.

### **1.3. ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА**

Испытания строительных конструкций, материалов и моделей связаны с определением большого числа параметров, характеризующих процесс загрузки и поведения их под нагрузкой. К таким параметрам относятся: силовые и температурные воздействия, перемещения, деформации, углы поворота и другие. Для измерения перечисленных параметров используются приборы и преобразователи, основанные на различных принципах действия.

При проведении натурных испытаний предпочтение отдается приборам, которые быстро устанавливаются на конструкцию, имеют достаточно широкий измерительный диапазон и автономное электрическое питание. Это приборы с механическим принципом действия и визуальным считыванием показаний.

Установка большого числа приборов при испытании моделей выдвигает требования к их минимальной массе, габаритам и скорости регистрации показаний. Такими качествами обладают современные электрические измерительные преобразователи, применяемые в сочетании с автоматизированными информационно - вычислительными комплексами.

#### **1.3.1. Механические приборы для определения прогибов, линейных деформаций**

При проведении испытаний натурных конструкций и крупномасштабных моделей широко используются механические измерители перемещений: барабанно-шестеренчатый прогибомер, реечно-шестеренчатый индикатор, рычажный тензомер и уровневый клинометр.

*Прогибомеры* применяются для измерения перемещений любой точки конструкции относительно другой неподвижной точки. При испытании строительных конструкций чаще всего применяются прогибомеры следующих ти-

пов: ПМ-2, ПМ-3 (прогибомеры системы Максимова с проволоочной связью и ценой деления шкалы 0,1мм); прогибомеры системы Аистова с ценой деления 0,01мм.

*Прогибомеры с проволоочной связью* обеспечивают достаточно высокую точность и практически неограниченный диапазон измерения перемещений. Они нашли широкое применение при измерении прогибов балок, ригелей, ферм, панелей перекрытий и определении выгибов стоек, колонн, стеновых панелей.

*Прогибомер Аистова* (рис.1.7) состоит из стального цилиндрического корпуса 1, на лицевой стороне которого расположены три шкалы со стрелками. Стрелка 2 фиксирует перемещение величиной 1см, стрелка 3 - 1мм и главная стрелка 4 - 0,01мм. С задней стороны корпуса расположен ролик 5, вокруг которого огибается проволочка 6, прикрепляемая одним концом к испытываемой конструкции. К другому концу проволочки подвешивается груз 7 весом 1кг. Внутри корпуса расположена система шестеренок, с помощью которой перемещение преобразуется в отклонение стрелок на шкале прибора.

*Индикаторы часового типа* (рис.1.8) используются для измерения небольших по величине перемещений. Индикатор состоит из цилиндрического корпуса 4, внутри которого размещается система шестеренок 6. На лицевой стороне прибора под стеклом располагается большая 8 и малая 9 кольцевые шкалы со стрелками. Через корпус проходит измерительный шток 1, на котором нарезана зубчатая рейка-кремальера, соединенная с зубчатой шестеренной трубкой. Для устранения зазора между зубьями кремальеры и шестеренок поставлена пружина.

Часовой зубчатый механизм, расположенный в корпусе прибора, преобразует вертикальное перемещение штока 1 во вращательное движение указательных стрелок.



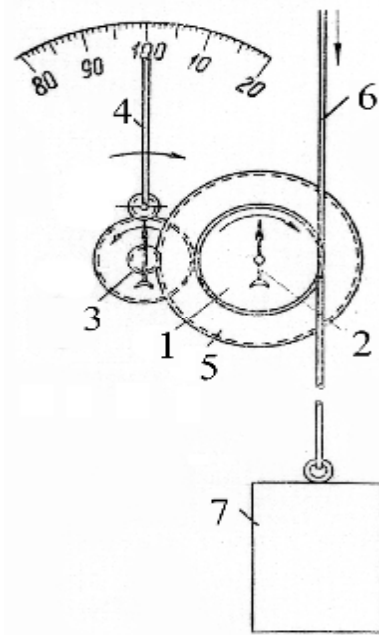


Рис.1.7 Прогибомер Аистова

бПАО:

1 – стальной цилиндрический корпус;

2 – стрелка, фиксирующая перемещения – 1см; 3 – то же – 1мм; 4 – то же – 0,01мм; 5 – ролик; 6 – проволока; 7 - груз

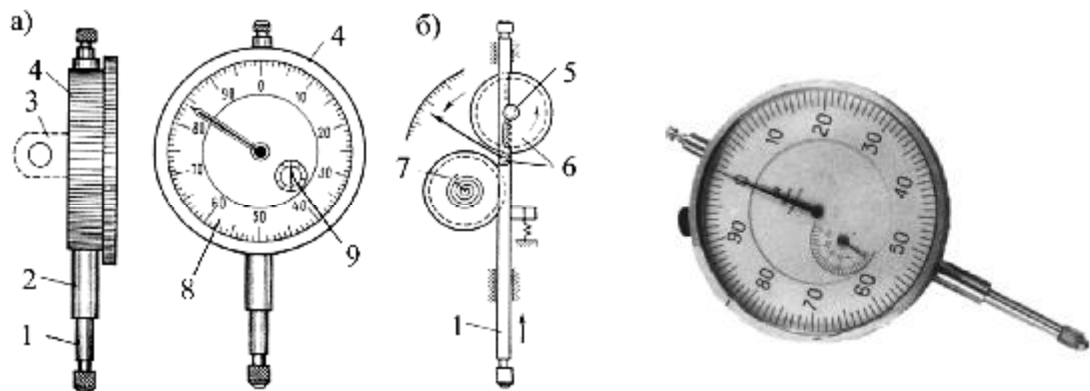


Рис.1.8 Индикатор часового типа:

а) конструктивная схема; б) кинематическая схема; в) общий вид;

1 - измерительный шток с зубчатой рейкой кремальерой; 2 – муфта; 3 – ушко; 4 – цилиндрический корпус; 5 – соединительная трубка с шестеренкой; 6 – шестеренки между кремальерой; 7 – пружина; 8 – большая шкала измерений; 9 – то же - малая

Индикаторы часового типа просты в обращении и обладают высокой точностью, поэтому их часто используют при испытании строительных конструкций. Индикаторы устанавливаются с помощью специального штатива и кулачка-держателя, к которым он крепится за муфту или серьгу.

*Механические тензометры* применяются для измерения величин малых линейных деформаций небольшого по длине участка конструкций. Тензометры изготавливают разных конструкций. Наибольшее применение при испытаниях строительных конструкций получили тензометры системы *Гугенбергера и Аистова* (ТА-2, ТА-3).

На рисунке (рис.1.9) показан электромеханический тензометр Аистова ТА-2 со счетчиком оборотов. Установка тензометров осуществляется прижатием их к поверхности конструкций с помощью струбцин.

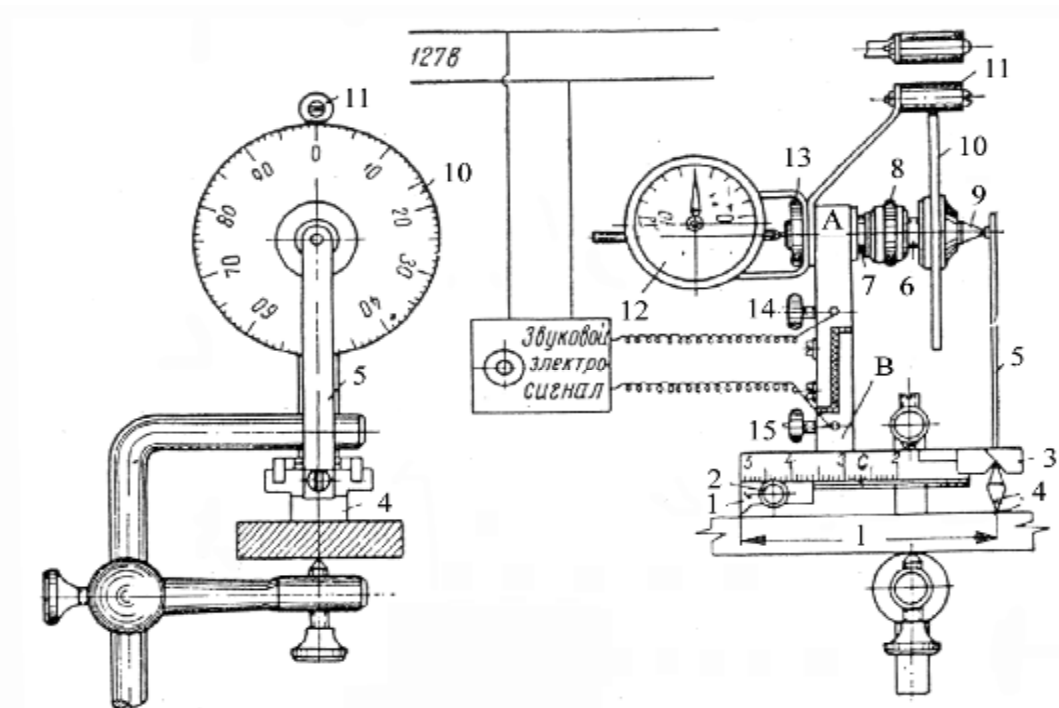


Рис.1.9. Тензометр Аистова ТА2 со счетчиком оборотов лимба:

1 – опорный нож; 2 – винт; 3 – вилка с опорными плоскостями 4 – призма; 5 – перо; 6 – микрометрический винт; 7 – муфта с винтовой нарезкой; 8 – натяжная гайка; 9 – микрометрический винт; 10 – лимб с делениями; 11 – указатель (индекс); 12 – счетчик; 13 – гайка; 14 и 15 – клеммы.

При этом плоскость тензометра должна быть перпендикулярна поверхности, на которой производят измерение.

При испытаниях строительных конструкций в настоящее время широкое применение получили приборы, позволяющие замерять неэлектрические величины (перемещения и деформации) электрическими методами. Такие приборы и аппаратура позволяют с высокой точностью измерять параметры во многих точках конструкций и на достаточно большом расстоянии. С помощью соответствующих регистрирующих устройств можно перейти к автоматической регистрации показаний, вводом их в ЭВМ для дальнейшей обработки и использования.

Для измерения деформаций электрическим методом широко используют *проволочные тензорезисторы* (рис.1.10). В основу метода измерения деформаций с помощью тензорезисторов положен тензометрический эффект - изменения электрического сопротивления проводника при его удлинении или укорочении. Это свойства называют *тензочувствительностью*.

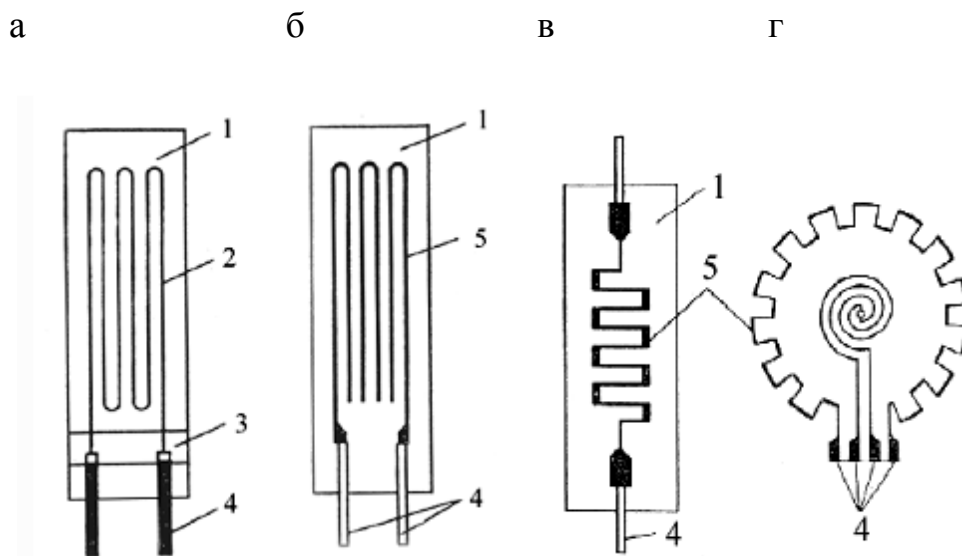


Рис.1.10. Тензорезисторы различных типов:

а - проволочный петлевой на бумажной основе; б - фольговый петлевой; в - фольговый короткобазный; г - фольговый мембранный сложной конфигурации; 1 - основа; 2 - константановая проволока; 3 - полоска бумаги; 4 - выводы; 5 - фольга

К преимуществам тензорезисторов относятся: возможность регистрировать деформации, как на поверхности, так и внутри конструкции; высокая точность измерения деформаций; измерение деформаций на всех стадиях нагружения; сравнительная простота их установки на испытываемую конструкцию и в местах, недоступных для размещения механических приборов. Для измерения деформаций в бетоне используются тензорезисторы с базой 50; 80; 100 мм, а в арматуре - с базой 10, 20, 30 мм.

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРМАТУРЫ И БЕТОНА

#### 2.1.1. Арматура

Физико-механические свойства арматуры зависят от химического состава, способа производства и обработки. Основными прочностными характеристиками для мягких сталей является физический предел текучести  $S_y$ . Для низколегированных сталей и высокопрочной проволоки – условный предел текучести  $S_{0,2}$ , принимаемый равным напряжению, при котором остаточные деформации составляют 0,2 %, и условный предел упругости  $S_{0,02}$ , при котором остаточные деформации равны 0,02 %.

К основным физико-механическим характеристикам арматуры также относятся:

$S_u$  - напряжение, соответствующее временному сопротивлению;

$E_s$  - модуль упругости арматуры;

$\delta\%$  - полное относительное удлинение после разрыва арматуры.

Определение физико-механических характеристик производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12004 "Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение". Для испытания используются образцы арматуры с необработанной поверхностью диаметром от 3 до 80 мм. Горячекатаную стержневую арматуру диаметром более 20 мм допускается испытывать на обточенных образцах с сохранением поверхности проката на головках образца.

При определении площади поперечного сечения учитывается качество и вид образцов. Площадь поперечного сечения необработанных образцов арматуры определяется по формуле:

$$A_s = m / \rho l;$$

где  $m$  - вес испытываемого образца, г.;  $r = 7,85 \text{ г/см}^3$  - плотность стали;  $l$  - длина образца, мм.

Площадь поперечного сечения обточенных и круглых образцов определяют по среднему арифметическому значению шести измерений диаметра в трех сечениях: в среднем и по концам рабочей длины в 2-х взаимно перпендикулярных направлениях. Диаметры образцов арматуры измеряют штангенциркулем или микрометром. Образцы арматурной стали, взвешивают на весах с погрешностью не более 1г при диаметре меньше 10 мм, 2 г при диаметре 10...20 мм и не более 1% от массы при диаметре больше 20 мм.

При проведении испытаний арматуры должны соблюдаться следующие требования:

- надежное центрирование образца;
- плавное загрузку;
- средняя скорость загрузки при испытании до предела текучести не должна быть более 10 МПа в секунду, за пределом текучести скорость нагружения может быть увеличена.

Физический предел текучести стали, устанавливается по диаграмме растяжения стержней и равен напряжению, соответствующему площадке текучести. Вычисление физического предела текучести производится по формуле:

$$S_y = F_y / A_o;$$

где  $F_y$  -наименьшая нагрузка, при которой деформации образца нарастают без заметного увеличения нагрузки, кН;  $A_o$  - площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>.

Временное сопротивление стали разрыву равно отношению максимальной нагрузки, воспринимаемой образцом, к площади поперечного сечения образца

$$S_u = F_{max} / A_o;$$

где  $F_{max}$  - максимальная нагрузка, кН.

Абсолютное удлинение образца определяется по шкале, закрепленной на станине разрывной машины.

Начальный модуль упругости вычисляется с погрешностью не более 1% по формуле

$$E_s = (\sigma_{0.35} - \sigma_{0.1}) / (\varepsilon_{0.35} - \varepsilon_{0.1});$$

где  $\sigma_{0.1}$ ;  $\sigma_{0.35}$  - напряжения в образце равные 0.1  $S_u$  и 0.35  $S_u$ ;  $\varepsilon_{0.1}$ ;  $\varepsilon_{0.35}$  - относительные деформации, соответствующие этим напряжениям.

### 2.1.2. Бетон

К физико-механическим характеристикам бетона относятся:

$R_m$  - кубиковая прочность бетона;

$R_b$  - призменная прочность бетона;

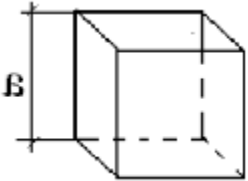
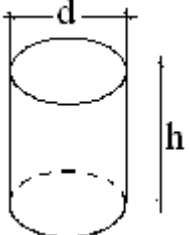
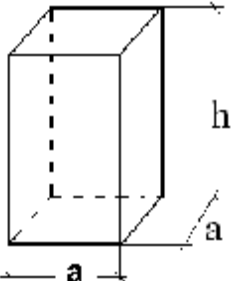
$R_{bt}$  - прочность бетона на растяжение;

$E_b$  - начальный модуль упругости бетона.

Физико-механические характеристики устанавливаются в результате испытаний контрольных образцов на сжатие и растяжение. Перед определением физико-механических характеристик необходимо произвести отбор образцов. Образцы изготавливаются в соответствии с ГОСТ 10180-91 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Формы и размеры образцов в зависимости от вида испытания должны соответствовать данным, представленным в табл. 2.1.

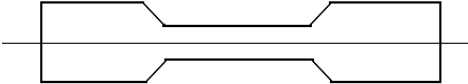
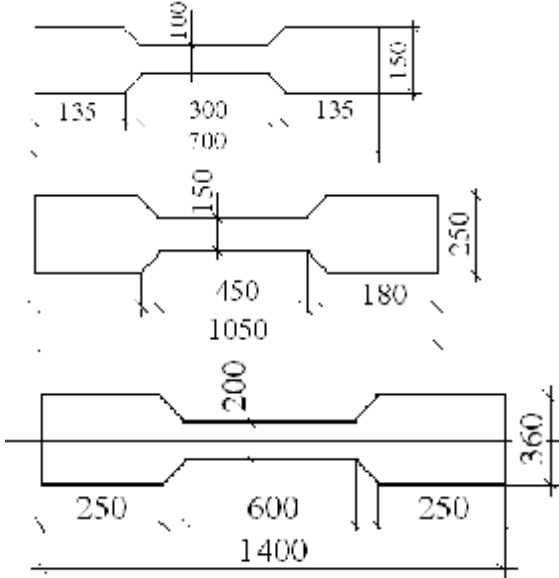
Таблица 2.1

## Образцы для испытания

Вид испытания	Форма образца	Геометрические размеры образца, мм.
Определение прочности на сжатие	<p><b>Куб</b></p>  <p><b>Цилиндр</b></p> 	<p>Длина ребра: 100, 150, 200, 300</p> <p>Высота <math>h</math> равна <math>d</math> или <math>2d</math></p>
Определение призмной прочности и начального модуля упругости	<p><b>Призма</b></p> 	<p><math>a \times a \times h</math>:</p> <p>100 × 100 × 400 150 × 150 × 600 200 × 200 × 800</p>



Продолжение таблицы 2.1

Вид испытания	Форма образца	Геометрические размеры образца, мм.
Определение прочности на осевое растяжение	<div>Восьмерка</div> 	

Образцы изготавливают в формах по ГОСТ 22685-89 «Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия».

Отклонения размеров отформованных образцов по длине ребер кубов, сторон поперечного сечения призм, восьмерок, указанных в таблице не должно превышать 1%.

Размеры образцов назначают в зависимости от размеров заполнителя.

### **Определение кубиковой прочности бетона**

Бетонные образцы (кубы) испытывают в соответствии с ГОСТ 10180-91.

Подготовленные к испытанию образцы устанавливают одной из заранее выбранных граней на нижнюю опорную плиту прессы таким образом, чтобы смещение центра образца относительно центра плиты не превышало 1% длины ребра куба или диаметра образца. Напряжение в образцах при нагружении должно возрастать непрерывно с постоянной скоростью  $0,6 \pm 0,2$  МПа/с до его разрушения.

При этом кубиковая прочность бетона  $R_m$  определяется по величине наибольшей нагрузки, поделенной на площадь поперечного рабочего сечения образца

$$R_m = \alpha F / A,$$

где  $F$  - разрушающая нагрузка, Кн;  $A$  - площадь рабочего поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;  $\alpha$  - масштабный коэффициент, зависящий от размера куба ( $\alpha = 1.05$  при  $a = 200$  мм;  $\alpha = 1$  при  $a = 150$  мм;  $\alpha = 0,95$  при  $a = 100$  мм – для всех видов бетона, кроме ячеистого).

Кубиковая прочность бетона принимается равной средней по результатам трех образцов. Разрушающее усилие фиксируется по силоизмерителю прессы с точностью, равной цене деления шкалы.

### Определение прочности бетона на растяжение

При испытании на осевое растяжение используется образец-восьмерка, закрепляемый в разрывной машине так, чтобы его геометрическая ось проходила через центры шарниров захватов. Напряжение в образце должно возрастать со скоростью 0,05.... 0,02 МПа/с до разрушения.

Прочность бетона на осевое растяжение определяется отношением разрушающей нагрузки к площади поперечного сечения образца

$$R_{bt} = \beta F / A;$$

где  $F$  - разрушающая нагрузка (разрывное усилие), кН;  $A$  - площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;  $\beta$ - масштабный коэффициент, определяемый в зависимости от стороны квадратной призмы ( $\beta=1,08$  при  $a=200$  мм;  $\beta=1$  при  $a=150$  мм;  $\beta=0,92$  при  $a=100$  мм).

### Определение призмной прочности бетона

Призмные образцы испытываются в соответствии с ГОСТ 10180-91 и ГОСТ 24452-80. При подготовке призмы к испытанию на боковых поверхностях размечаются центральные линии для установки приборов. С помощью специальных стальных рамок по четырем сторонам призмы закрепляются индикаторы часового типа для замера деформаций (рис. 2.1). Образец с приборами устанавливается на нижнюю опорную часть пресса по центру плиты. Делается установка начального отсчета по делениям шкалы прибора.

Скорость нагружения в пределах каждой ступени должна составлять  $0,6 \pm 0,2$  МПа/с.

Приборы с образца снимаются при достижении нагрузки  $40 \pm 5$  % от разрушающей. Дальнейшее нагружение осуществляется непрерывно с постоянной скоростью до разрушения образца.

Призменная прочность бетона определяется отношением разрушающей нагрузки к площади поперечного сечения призмы

$$R_b = a (F / A);$$

где  $F$  - разрушающая нагрузка, кН;  $A$  - площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;  $a$  - масштабный коэффициент, зависящий от размера стороны призмы ( $a=1,05$  при  $a=200$  мм;  $a=1$  при  $a=150$  мм;  $a=0,95$  при  $a=100$  мм).

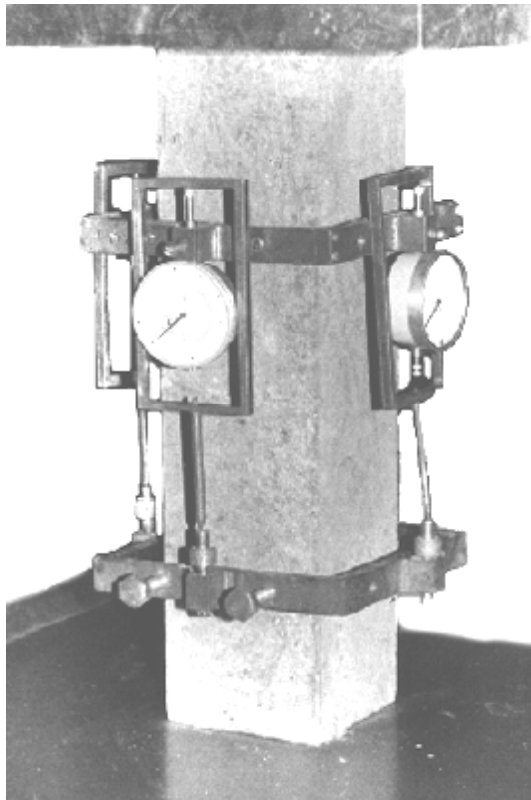


Рис.2.1. Общий вид испытания бетонных призм и расположение индикаторов.

### Определение начального модуля упругости бетона

Начальный модуль упругости бетона соответствует лишь упругим деформациям бетона, возникающим при мгновенном загрузении. В связи с этим начальный модуль упругости бетона при сжатии определяется из зависимости:

$$E_b = \sigma_{0.3} / \varepsilon_{0.3},$$

где  $S_{0,3}$ - напряжение в бетоне, соответствующее 30% от разрушающей нагрузки;  $e_{0,3}$  - относительные деформации бетона при соответствующих напряжениях.

## 2.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Перед началом испытаний должна быть сделана предварительная подготовка:

- смонтированы нагрузочные приспособления;
- установлены приборы, подмости и ограждения;
- выполнены работы по предварительному загрузению испытательной конструкции.

Предварительное загрузение является контрольным этапом испытания. На данной стадии проверяется надежность нагрузочных приспособлений, крепление приборов и испытываемой конструкции, правильность показаний установленных приборов.

Интенсивность предварительного загрузения принимается обычно равной величине первой ступени нагрузки, предусмотренной программой испытаний. Все, неудовлетворительно работающие, приборы и приспособления, выявленные во время контрольных загрузений, подлежат ремонту или замене.

Загрузение конструкций при испытании осуществляется ступенями. Каждая ступень не должна превышать 10% контрольной нагрузки при проверке прочности и трещиностойкости и 20% контрольной нагрузки при проверке жесткости конструкций. На каждой ступени конструкцию выдерживают не менее 10 минут.

После приложения каждой ступени нагрузок производится тщательный осмотр конструкции для выявления как вновь появившихся повреждений, так и

степени развития уже имеющихся. На поверхности конструкции с помощью карандаша наносятся контуры трещин, обводятся контуры сколов и других повреждений. Концы трещин отмечают поперечными штрихами, рядом с которыми пишут номера ступеней нагрузок. Совокупность таких отметок дает наглядную картину постепенного развития повреждений и трещин по мере роста испытательной нагрузки.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси конструкций, измеряют на уровне растянутой арматуры, а ширину раскрытия наклонных трещин, в местах пересечения их хомутами.

Для улучшения видимости трещин поверхность конструкций перед испытанием покрывают раствором мела или извести.

Ширина раскрытия трещин определяется при помощи микроскопа МПБ – 3. Микроскоп устанавливается вплотную к поверхности конструкций. Место установки окуляра, прилегающего к плоскости конструкции, обводится карандашом для того, чтобы измерение трещин производилось каждый раз в одном месте.

Приборы устанавливают на испытываемую конструкцию в местах, где измеряемые показатели достигают наибольших значений. Нецелесообразно ставить приборы в зоне «нулевых» значений (например, тензометры размещать на нейтральной оси изгибаемого элемента).

Не следует увеличивать общее число устанавливаемых приборов, так как при этом увеличивается время снятия отсчетов, усложняется процесс испытаний и обработка их результатов.

Запись показаний приборов на каждой ступени осуществляют после 10-ти минутной выдержки приложенной нагрузки. Отсчеты по всем измерительным приборам должны производиться быстро, чтобы их показания соответствовали одному и тому же деформированному состоянию испытываемой кон-

струкции. Показания приборов, схемы их расположения, данные замеров трещин заносятся в журнал испытаний.

Для повышения качества обработки результатов и анализа напряженно – деформированного состояния исследуемых конструкций и моделей желательно производить видеосъемку или фотографировать основные этапы испытаний.

### 2.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Первым этапом обработки является тщательный контроль достоверности полученных экспериментальных данных. На месте испытаний сразу же следует вычислять разности отсчетов приборов с предварительной оценкой их достоверности. При обнаружении скачка в отсчетах необходимо выяснить причину. Если во время испытаний будет отмечен скачок в показаниях приборов, необходимо немедленно обследовать поверхность конструкции в пределах его базы и в случае обнаружения трещины этот прибор должен быть исключен при дальнейшем испытании.

По окончании испытания производится камеральная обработка полученных результатов. Обработка заключается в определении продольных и поперечных сил, изгибающих моментов, вычислении относительных деформаций, прогибов и построение графиков.

Оценка результатов испытаний производится на основании всестороннего анализа и сопоставления с данными теоретических расчетов, уточненных в соответствии с фактическими размерами, характеристиками материалов и состояния конструкций.

Наиболее полная оценка может быть дана при рассмотрении результатов испытаний конструкций до исчерпания несущей способности. При этом могут быть выявлены следующие основные вопросы:

- каким образом происходит потеря несущей способности;
- соответствует ли фактическая разрушающая нагрузка теоретической и степень их расхождения;
- соответствуют ли измеряемые во время испытания перемещения и деформации, вычисленным теоретически.



## 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Оценка результатов испытаний, обоснованность выводов во многом определяется достоверностью информации, получаемой при испытаниях. Свойства железобетонных конструкций определяются неоднозначно, имеют вероятностный характер в силу неоднородности физических свойств материалов, неточностей изготовления конструкций и не идеальности схем загрузки. Проведение испытаний неизбежно связано с систематическими и случайными погрешностями измерений. Оценка перечисленных факторов и их учет при подготовке, проведении и обосновании результатов эксперимента относятся к области технической науки, когда изучаются статистические законы проявления случайных величин и используется математический аппарат теории планирования эксперимента. В любом случае математически обоснованный эксперимент подразумевает проведение некоторого числа испытаний, при котором исключается или минимизируется влияние ошибок измерений и проявление нестабильности свойств материалов. Лабораторные работы выполняются на единичных образцах, в таких условиях отсутствует возможность теоретически обосновать достоверность результатов. Поэтому оценка достоверности результатов будет неполной и основывается на учете погрешностей измеряемых величин. Для оценки погрешности проводимых лабораторных экспериментов необходимо знать с какой точностью (ошибкой) определены значения исходных величин. Различают ошибки абсолютные и относительные.

Абсолютной ошибкой считается величина  $\Delta a$ , на которую отличается экспериментальное значение  $a_1$  от истинного значения  $a$

$$\Delta a = a - a_1 .$$

Относительная ошибка определяется делением абсолютной ошибки  $\Delta a$  на экспериментальное  $a_1$  или истинное значение  $a$  измеряемой величины

$$\Delta a / a_1 \text{ или } \Delta a / a.$$

Для оценки точности результатов эксперимента абсолютная ошибка сама по себе не имеет значения. Важно лишь учитывать, к какому искомому значению она относится.

Точность результатов проводимых испытаний зависит от ряда факторов:

- от точности измерения деформаций;
- от точности определения размеров исследуемых конструкций;
- от точности определения пробной нагрузки или силы, действующей на исследуемый элемент;
- от точности определения физико-механических характеристик материалов испытываемого образца.

Кроме того, на точность результатов испытаний влияют условия, при которых они проводятся. К ним относятся действие ветра, влияние температуры, неправильная установка приборов, сотрясения и т.п.

Все ошибки испытаний, зависящие от точности приборов, точности определения нагрузок, от условий проведения экспериментов, могут влиять на точность вычислений прогибов, продольных деформаций, усилий в большую или меньшую сторону. При неблагоприятном стечении обстоятельств все ошибки могут оказаться одного знака и точность эксперимента будет зависеть от суммарной величины всех ошибок.

Принято считать, что при чтении каждого отсчета по шкале прибора можно ошибиться в ту или иную сторону на половину деления шкалы прибора. Разность показаний прибора до и после приложения нагрузки равна:

$$\Delta l = c_1 - c_2 ,$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – соответствующие отсчеты по приборам.

В наихудшем случае - один отсчет может быть прочтен большим на 0,5 деления, другой – меньшим на 0,5 деления. При этом ошибка разности  $c_1 - c_2$  будет равна одному делению шкалы в большую или меньшую сторону, т.е.

$\Delta a = \pm 1$  деление и не зависит от величины разности отсчетов. Относительная ошибка измерений определяется из выражения:

$$\Delta a / a = \pm 1 / (c_1 - c_2).$$

Погрешность расчета испытательной нагрузки вычисляется по формуле

$$DF = DP \frac{dF}{dP} + DD \frac{dF}{dD} = \frac{DP \times p \times D^2}{4} + \frac{DD \times P \times D}{2},$$

где  $DP$  - погрешность определения давления рабочей жидкости домкратов, измеряемое манометром;  $D$  – давление поршня;  $P$  – давление, при котором определяется величина нагрузки  $F$ .

$$\text{Величина нагрузки равна } F = \frac{P \times p \times D^2}{4}.$$

Погрешность расчета изгибающих моментов при проведении лабораторных работ определяются из выражения

$$\Delta M = 0,5(\Delta F \times L_2 + F \times \Delta L_2),$$

где  $L_2$  – расстояние от опоры балки до точки приложения силы;  $F$  – нагрузка, от которой определяется момент;  $\Delta L_2$  – погрешность измерения величины  $L_2$ .

Примеры вычисления погрешностей приведены в третьей главе.

### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждая лабораторная работа включает следующие этапы.

**1. Подготовка.** При подготовке студент обязан проработать соответствующие разделы теоретического курса, ознакомиться с материалами данного учебного пособия.

**2. Исходные данные.** К исходным данным относятся результаты испытаний бетоны и арматуры; геометрия и армирование образцов; устройство и размеры испытательных установок; схемы расстановки, марки, единицы и погрешности измерительных приборов.

**3. Испытания.** Последовательное нагружение образцов статической нагрузкой, запись показаний приборов и наблюдений за развитием трещин. Запись схемы разрушения образцов.

**4. Обработка.** Вычисление прочностных и деформативных характеристик материалов, величин нагрузок, перемещений, относительных деформаций, кривизн и ширины раскрытия трещин. Расчет экспериментальных значений измеряемых параметров с учетом погрешностей измерений, построение диаграмм, теоретический расчет трещиностойкости и прочности образцов, сопоставление экспериментальных и теоретических результатов, оформление отчета и подготовка к защите.

**5. Защита.** Проводится индивидуально каждым студентом после оформления отчета. Отчет должен быть проверен и подписан преподавателем. Защита подразумевает собеседование по материалам отчета и ответы на контрольные вопросы.

Лабораторные работы традиционно являются важной частью в изучении конструкторских дисциплин. Испытания железобетонных конструкций нагляд-

но демонстрируют их поведения на всех стадиях нагружения, дают возможность осмыслить результаты испытаний, позволяют успешно освоить сущность конструирования и концепции теории железобетонных конструкций.

При выполнении лабораторных работ студенту представляется практическая возможность изучить:

- планирование и подготовку физического эксперимента по испытанию строительных конструкций на статические нагрузки;
- устройство, установку и работу измерительных приборов;
- поведение образцов железобетонных конструкций в стадиях деформирования, характеризующихся работой без трещин и с трещинами в растянутой зоне сечений;
- схемы разрушения образцов железобетонных конструкций при изгибе и сжатии;
- методику расчета прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры;
- методику и расчеты, связанные с обработкой эксперимента;
- анализ и сопоставление результатов эксперимента и теоретического расчета.

### 3.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

#### Испытание железобетонной балки с разрушением по нормальному сечению

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** *Изучение напряженно-деформированного состояния железобетонной балки в зоне чистого изгиба на всех стадиях ее загрузки.*

В ходе выполнения первой лабораторной работы решаются следующие задачи:

- изучение работы балки до появления трещин в растянутой зоне (первая стадия напряженно-деформированного состояния);
- изучение особенностей напряженно-деформированного состояния железобетонной балки при образовании трещин и их последующее раскрытие (вторая стадия напряженно-деформированного состояния);
- исследование характера образования и развития трещин и разрушения балки по нормальному сечению;
- определение экспериментального и теоретического моментов образования трещин, сравнение их величин;
- определение экспериментального и теоретического разрушающего моментов, сравнение их величин;
- обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

### Экспериментальный образец

Для реализации поставленных задач используется железобетонная балка прямоугольного сечения из тяжелого бетона, армированная плоским сварным каркасом (рис. 3.1.1.).

Продольная рабочая арматура стержневая диаметром 10 мм класса А – I

<i>Длина балки</i>	<i>L</i>	<i>120 см</i>
<i>ширина балки</i>	<i>b</i>	<i>8 см</i>
<i>высота сечения</i>	<i>h</i>	<i>16 см</i>

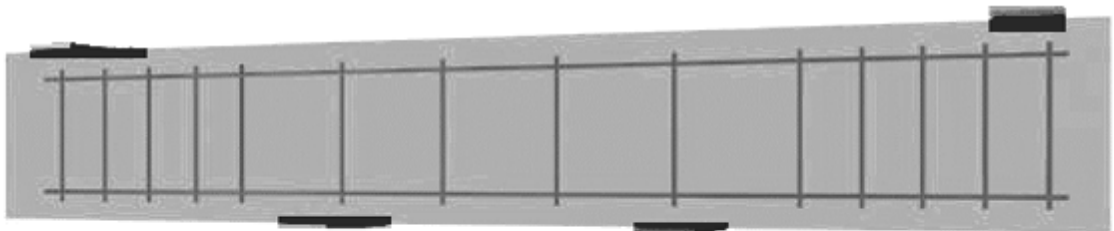


Рис. 3.1.1. Экспериментальный железобетонный образец

### Экспериментальный стенд

Испытание железобетонной балки выполняется на стенде (рис. 3.1.2.), который состоит из основания и четырех вертикальных стоек. На стойках закреплены шарнирные опоры и дополнительные уголки для установки индикаторов. Загрузочное устройство состоит из гидравлического домкрата и траверсы, размещенных на верхнем поясе сварной станины.

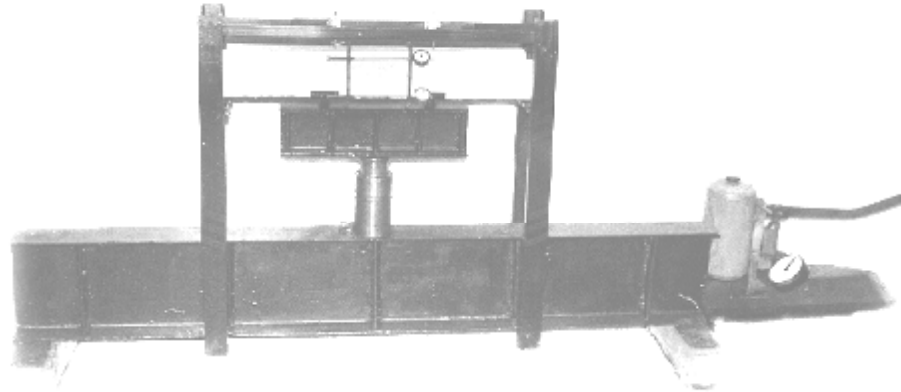


Рис. 3.1.2. Общий вид экспериментального стенда при испытании балки с разрушением по нормальному сечению

Загружение балки осуществляется гидравлическим домкратом ДГ25 с диаметром поршня 100 мм.

Измерение длин производится с помощью рулетки, диаметры измеряются штангенциркулем. Вертикальные перемещения балки фиксируются индикаторами часового типа ИЧ-25, деформации удлинения или укорочения - индикаторами часового типа ИЧ-10. Ширина раскрытия трещин определяется с помощью микроскопа МПБ-3. На рис.3.1.3. приведены перечисленные приборы и инструменты.

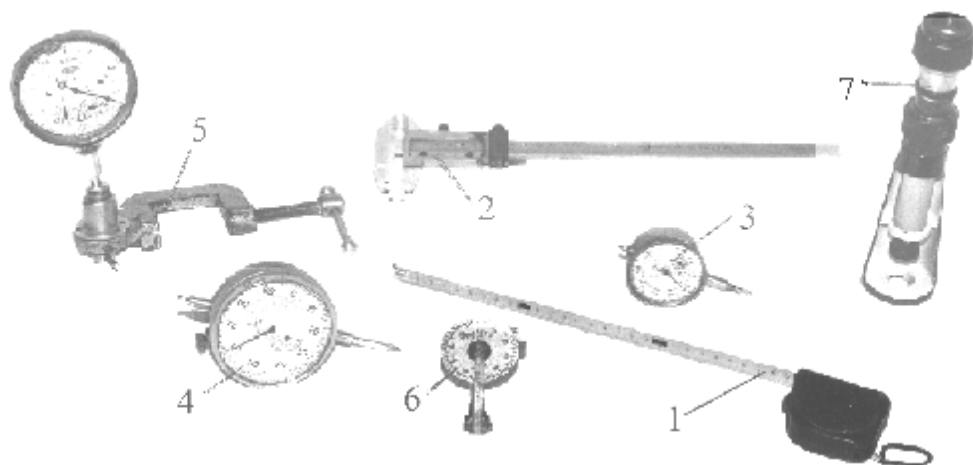




Рис. 3.1.3. Общий вид измерительных приборов и инструментов  
1-рулетка; 2-штангенциркуль; 3-индикатор часового типа ИЧ-10; 4-индикатор часового типа ИЧ-25; 5-прогибомер ПАО-6; 6-тензомер ТА-2; микроскоп МПБ-3

### **3.1.1. Определение физико-механических характеристик материалов**

Физико-механические характеристики материалов, из которых изготовлены опытные образцы балок, определяются экспериментальным путем.

Испытания арматуры проводятся на разрывной машине (рис. 3.1.4). При испытаниях используются образцы круглой стали с необработанной поверхностью с номинальным диаметром 10 мм с рабочей длиной  $l_k > 200$  мм. Диаметр арматуры определяется с помощью штангенциркуля в трех сечениях: в середине и по концам образца. Средняя скорость нагружения при испытании до предела текучести составляет 1 мм / мин, за пределами текучести – 2мм/ мин. Результаты испытаний приведены в табл. 3.1.1 и на диаграмме растяжения (рис.3.1.5).

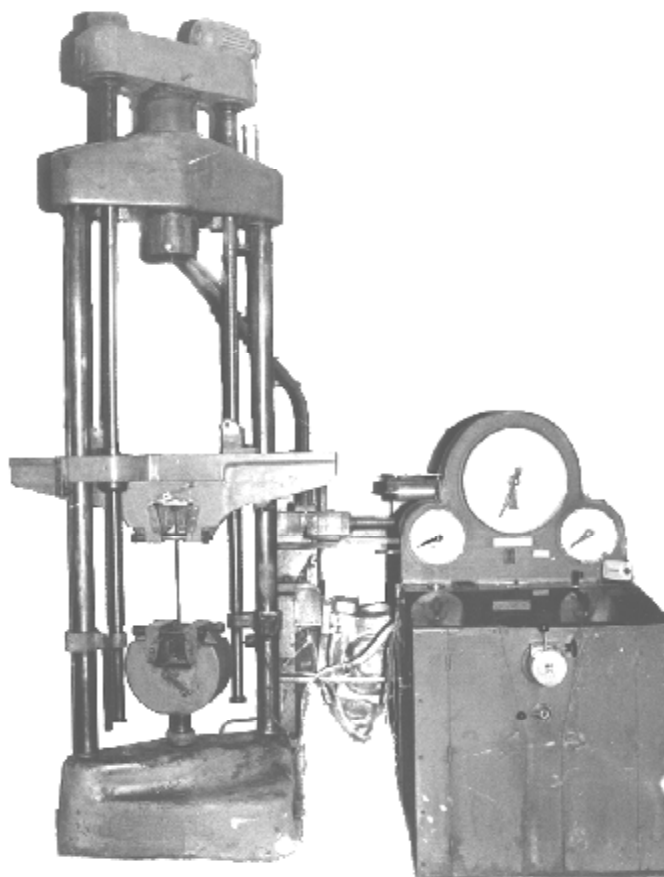


Рис. 3.1.4. Общий вид разрывной машины

Испытание кубов производится на прессе П-125 (рис. 3.1.6). На рис. 3.1.7-3.1.8 приведены фрагменты последовательности разрушения образцов.

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимается за разрушающую нагрузку. Пример оформления результатов испытаний бетонных образцов кубов и их обработка приведены в табл.3.1.2.

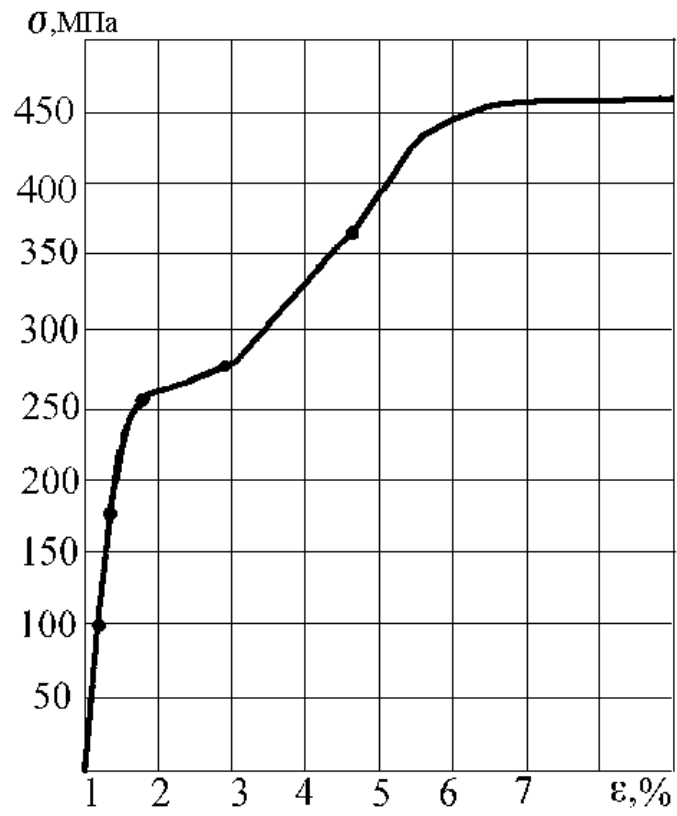


Рис. 3.1.5. Диаграмма растяжения  
арматурной стали класса А-I

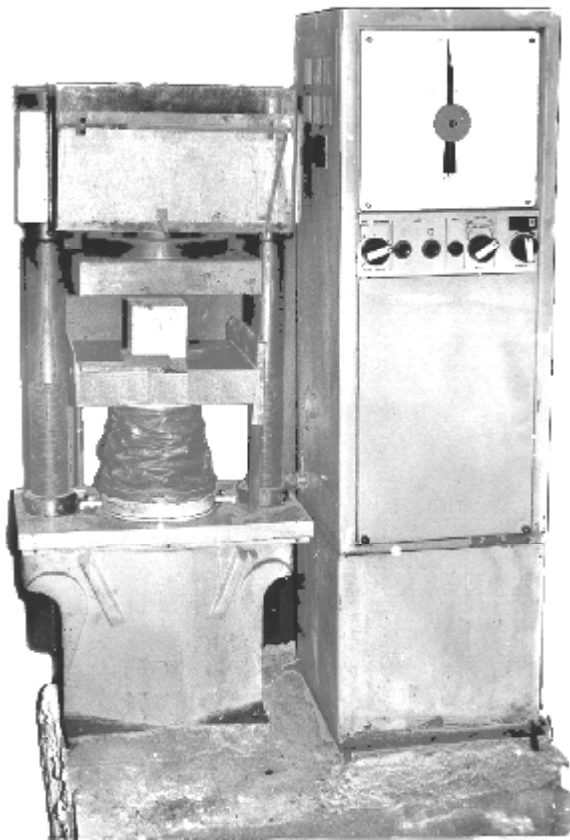


Рис. 3.1.6. Испытание бетонных кубиков на прессе П-125

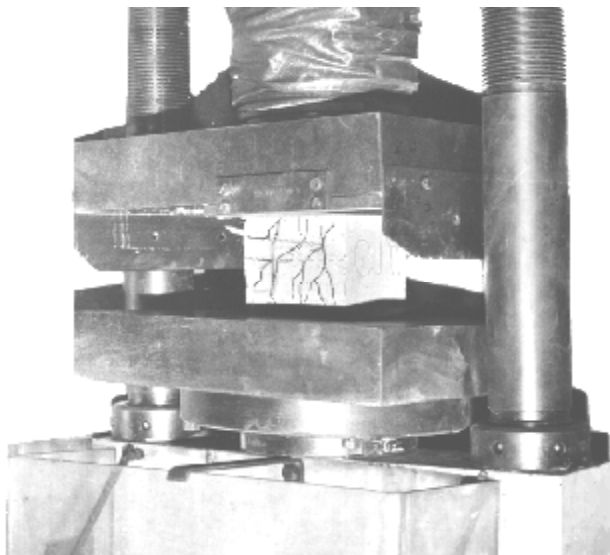


Рис. 3.1.7. Формирование трещин в бетонном кубике под действием сжимающей нагрузки

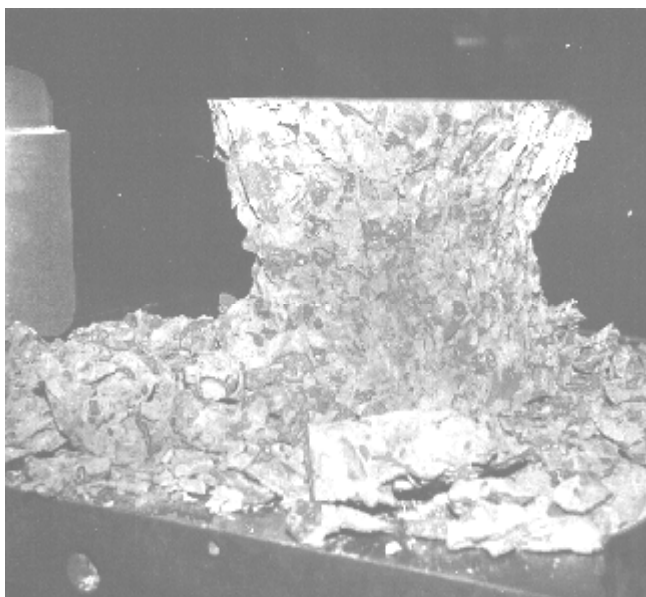


Рис. 3.1.8. Общий вид разрушенного бетонного кубика при испытании на сжатие

Таблица 3.1.2.

**Результаты испытаний бетонных кубиков на сжатие и их обработка**

№ образца	Размеры сечения	Разрушающее усилие $F$ , кН	Площадь поперечного сечения $A$ , $\text{см}^2$	$R_m = \alpha \cdot F/A$ , МПа
1	10 ´ 10,1	230,5	101	21,68
2	10 ´ 10,2	211,5	102	19,70
3	10 ´ 10,0	232,2	100	22,06

Кубиковая прочность бетона по результатам испытаний -  $R_m = 21,15 \text{ МПа}$   
( $\alpha=0,95$  – масштабный коэффициент для куба с ребром 100 мм)

Для определения призмной прочности и модуля упругости бетона используются образцы размерами 100x100x400 мм. Испытания проводятся на прессе П–125. Для замера деформаций призмы на специальных рамках были устанавливаются индикаторы часового типа ИЧ – 10 (рис. 3.1.9.).

Результаты испытаний и их обработка показаны на рис. 3.1.10 и в табл.3.1.3.

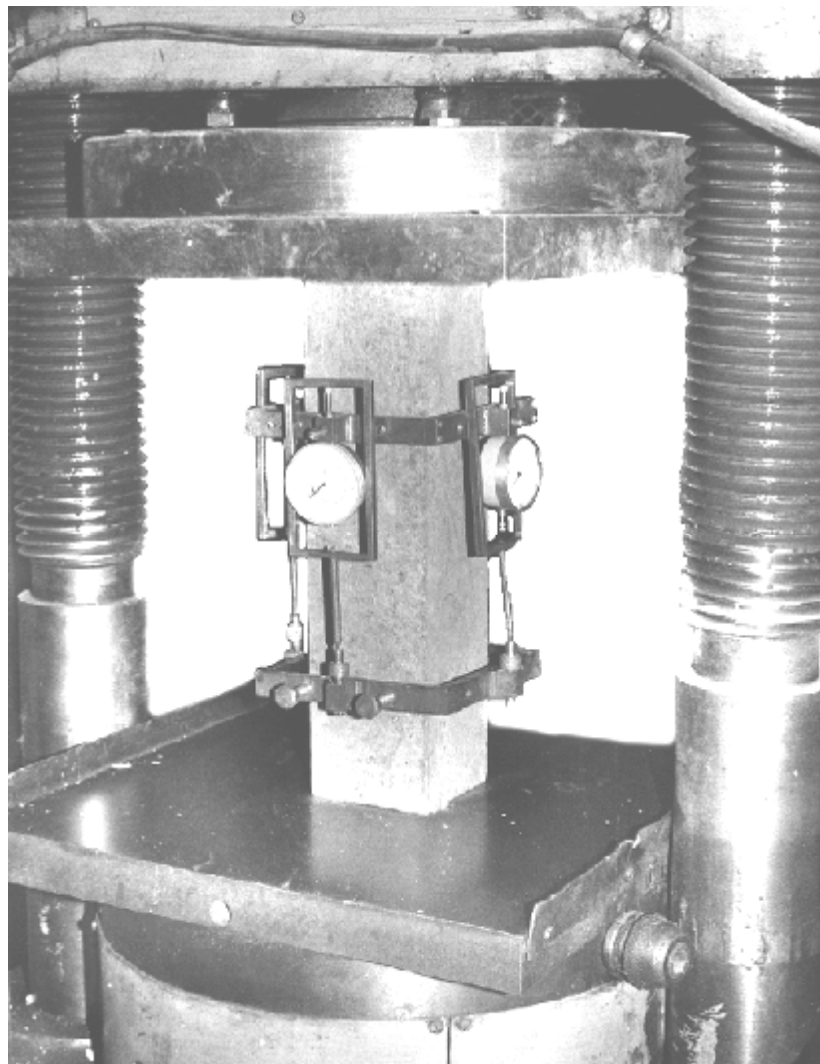


Рис. 3.1.9. Фрагмент испытания бетонных призм.

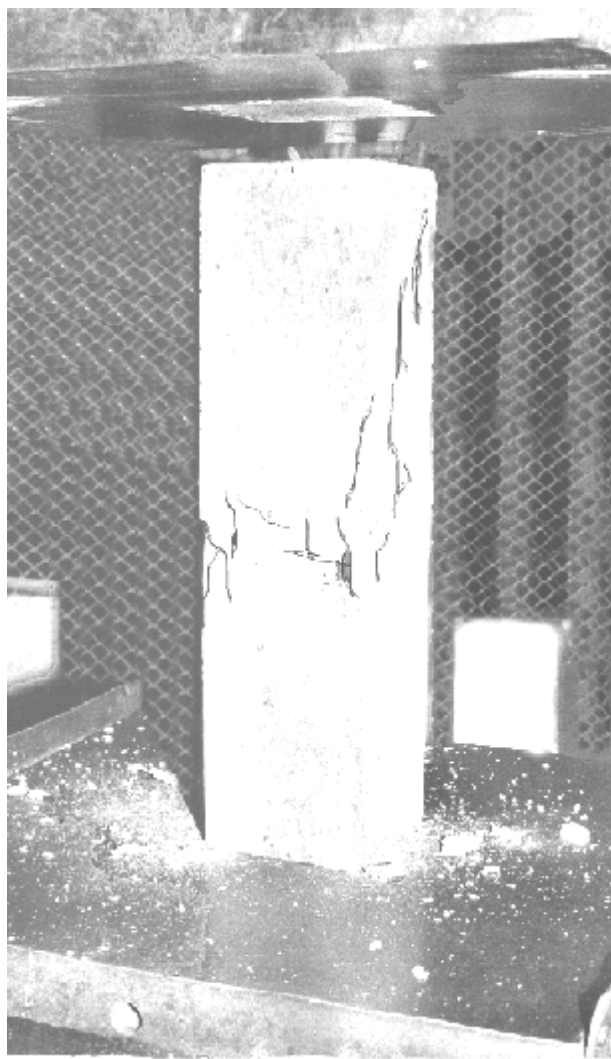


Рис. 3.1.10. Фрагмент разрушения бетонной призмы

Таблица 3.1.3.

**Результаты испытаний призмных образцов и их обработка.**

№ образца	Размеры сечения, см	Разрушающее усилие $F$ , кН	Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	$R_b = \alpha \cdot F / A$ , МПа
1	10 ´ 10	178,95	100	17,00
2	10,1 ´ 10	180,84	101	17,01
3	10,2 ´ 10	183,38	102	17,08

-  $\alpha = 0,95$  – масштабный коэффициент

**$R_{b\text{ ср}} = 17,03$**

Призменная прочность бетона по эмпирической формуле равна

$$R_b = R_m (0,77 - 0,00125 R_m) = 21,15 (0,77 - 0,00125 \cdot 21,15) = 15,73 \text{ МПа},$$

где  $R_m = 21,15 \text{ МПа}$  - кубиковая прочность бетона, установленная из испытания.

Исходя из результатов замера деформаций и их обработки, строится диаграмма «напряжения-деформации» (рис. 3.1.11.).

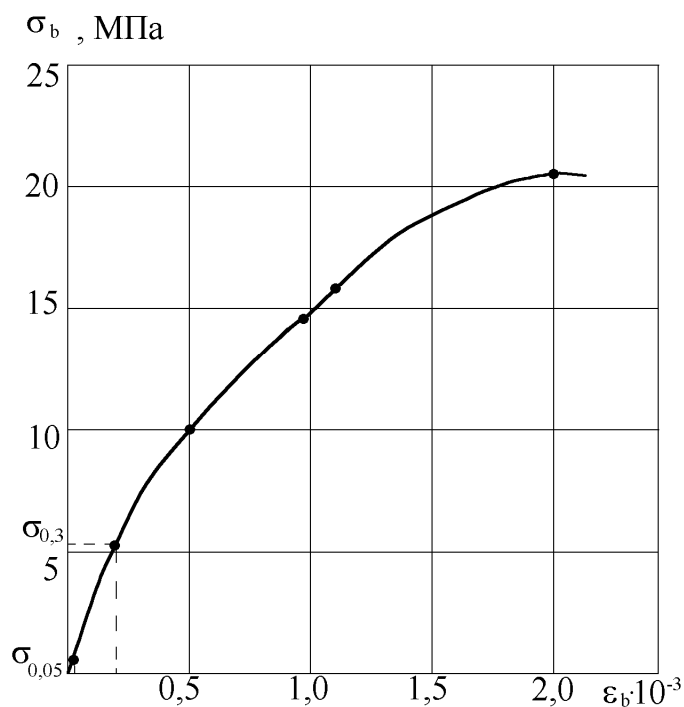


Рис. 3.1.11. Диаграмма «напряжения-деформации» при испытании призмических образцов

По диаграмме «напряжения-деформации» определяются напряжения соответствующие 30% от разрушающей нагрузки:

$$\sigma_{0,3} = 5,109 \text{ МПа}.$$

При этих же напряжениях относительные деформации составляют:

$$\varepsilon_{0,3} = 0,2 \cdot 10^{-3}.$$



Начальный модуль упругости бетона по результатам испытаний вычислялся по формуле

$$E_b = \sigma_{0,3} / \varepsilon_{0,3} = 5,109 / 0,2 \cdot 10^{-3} - 0,042 \cdot 10^{-3} = 25545 \text{ МПа.}$$

Начальный модуль упругости бетона, определяющийся по эмпирической формуле

$$E_b = (52000 \cdot R_m) / (23 + R_m) = 52000 \cdot 21,15 / (23 + 21,15) = 24910 \text{ МПа.}$$

Для определения прочности бетона на растяжение используется образец восьмерка. Общий вид и размеры образца приведены на (рис. 3.1.12.).

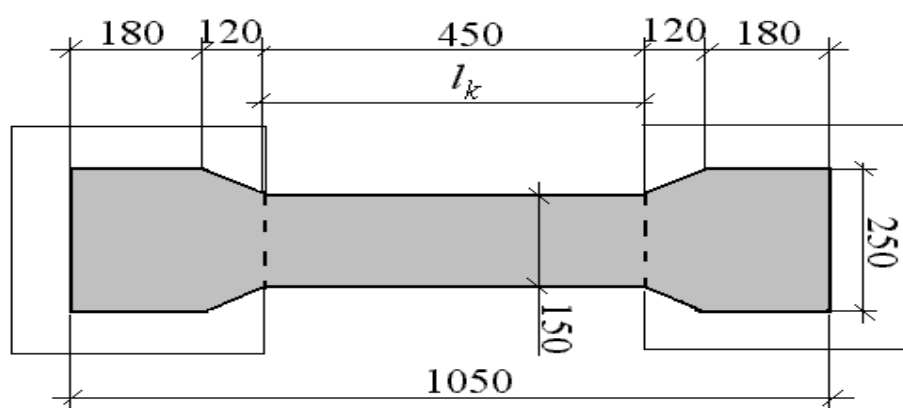


Рис. 3.1.12. Общий вид контрольного образца-восьмерки при испытании на растяжение.

Испытание на осевое растяжение выполняются на разрывной машине, при этом напряжение в образцах возрастает со скоростью  $0,05 \pm 0,02$  МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл.3.1.4.

Таблица 3.1.4.

**Результаты испытаний образцов – восьмерок на осевое растяжение**

№ образца	Размеры сечения, см	Разрушающее усилие F, кН	Площадь поперечного сечения A, см <sup>2</sup>	$R_{bt} = F / A$ , МПа
1	15 ´ 15	42,58	226,5	1,88

2	15 ´ 15,2	44,69	228,0	1,96
3	15 ´ 15	43,88	225,0	1,95

( $\beta=1$  – масштабный коэффициент при  $a=150$  мм)

**$R_{bt} = 1,93$**

Прочность бетона на растяжение по эмпирической формуле:

$$R_{bt} = 0,05 [(10 \cdot R_m)^2]^{1/3} = 0,05 [(10 \cdot 21,15)^2]^{1/3} = 1,78 \text{ МПа},$$

где  $R_m = 21,15$  Мпа - кубиковая прочность, установленная в результате испытаний.

### 3.1.2. Проведение лабораторной работы

Схема загрузки экспериментального образца определяется задачами испытания. Усилие от гидродомкрата на балку передается в двух точках через распределительную траверсу (рис. 3.1.13.). На участке балки между парой сосредоточенных сил создается зона чистого изгиба.

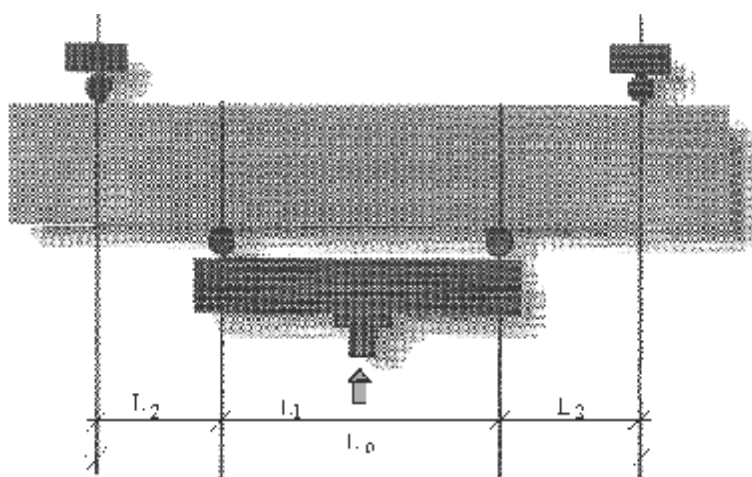


Рис.3.1.13. Схема загрузки балки

До начала испытаний замеряется расчетный пролет балки  $L_0$ , расстояние между точками приложения нагрузки  $L_1$  и  $L_2$  - от опоры балки до точки приложения нагрузки. При этом определяется база измерения деформации  $K$  и расстояние между сжатыми и растянутыми волокнами -  $H$ . Данные заносятся в журнал испытания.

Экспериментальная балка оснащается приборами для измерения прогибов П1 и П2 и деформаций И1...И4. Расстановка приборов показана на рис. 3.1.14.

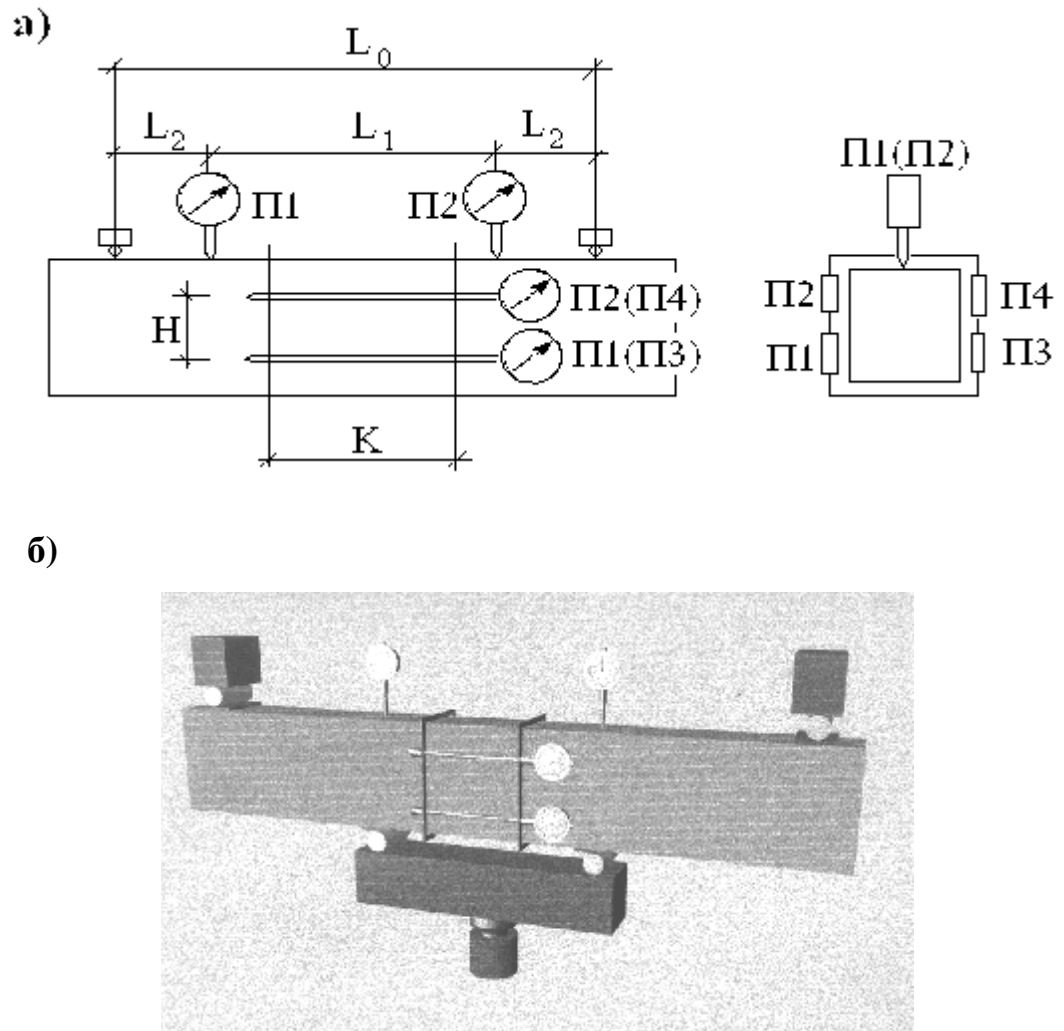


Рис. 3.1.14. Расстановка приборов на экспериментальной балке при испытании с разрушением по нормальному сечению: а) схема расстановки приборов; б) экспериментальная балка

Перед загрузением балку осматривают, зарисовывают начальные (нулевые) трещины и околы бетона. Затем снимают начальные отсчеты по индикаторам и заносят в ведомость испытаний (табл.3 журнала испытаний). Загружение балки осуществляется этапами. После каждого этапа нагружения делается выдержка не менее 10 минут. В конце выдержки снимаются показания по при-

борам, измеряется ширина раскрытия трещин. На поверхности балки проводятся карандашом линии параллельные трещинам с проставлением номера этапа. Показания приборов заносятся в ведомость испытаний. Испытания балки проводятся до ее полного разрушения. Фрагмент разрушения балки по нормальному сечению показан на рис. 3.1.15.

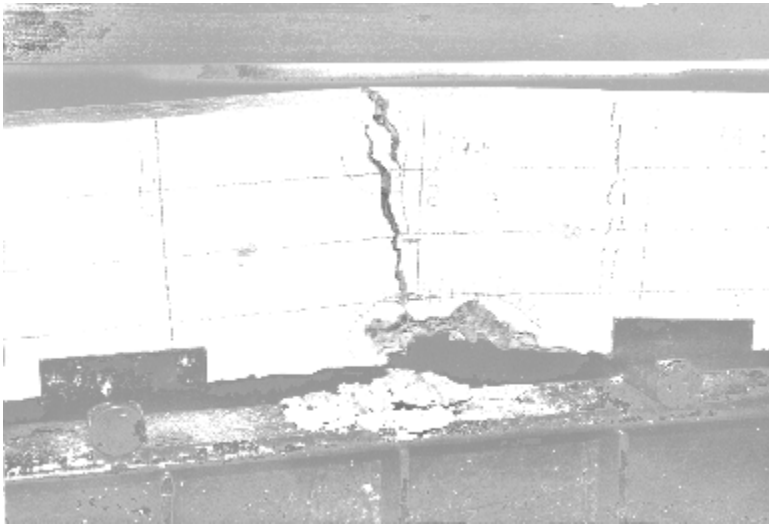


Рис. 3.1.15. Фрагменты разрушения по нормальному сечению

### 3.1.3. Обработка экспериментальных данных

Обработка результатов испытаний производится в следующей последовательности:

1. Усилие, создаваемое домкратом, определяется как произведение величины давления в гидросистеме  $r$  на площадь поршня  $A$

$$F = r \cdot A$$

2. Вычисляется изгибающий момент в зоне чистого изгиба

$$M = 0,5 F_i L_2,$$

где  $F_i$  - нагрузка на этапе загрузки, кН;  $L_2$  - расстояние от опор до точки приложения силы, м.

3. Прогибы по каждому прогибомеру определяется по формуле:

$$f_i = (N_i - N_0) \gamma,$$

где  $N_i$  - показания приборов на  $i$ - том этапе;  $N_0$ - показания индикатора на начальном этапе;  $\gamma$  – цена деления прибора, мм.

Например, для прибора П1 начальный отсчет равен  $N_0=600$ , на первом этапе загрузки  $N_1=747$ , цена деления ИЧ-25  $\gamma=0,01$  мм. Тогда перемещение на первом этапе загрузки для прибора П1 составит:

$$f_1 = (747 - 600) \cdot 0,01 = 1,47 \text{ мм.}$$

Величина прогиба балки определяется как среднее арифметическое прогибов рассчитанных по показаниям прогибомеров П1 и П2.

4. Вычисляются относительные деформации сжатия и растяжения бетона на каждом этапе загрузки

$$\varepsilon = (N_i - N_0) \gamma / K,$$

где  $K$  – база измерения деформаций.

Величина относительных деформаций принимается как среднее арифметическое значение по показаниям 2-х индикаторов.

5. Кривизна продольной оси  $1/r$  определяются приближенно по формуле:

$$1/r = \operatorname{tg} \varphi = (|\varepsilon_c| + |\varepsilon_t|) / H,$$

где  $H$ -расстояние между индикаторами (по вертикали).

Расчеты по показаниям приборов заносятся в табл.3.1.4.

6. На основе обработанных данных строятся диаграммы:

- «Нагрузка  $F$ - прогиб- $f$ »;
- «изгибающий момент  $M$  – кривизна  $1/r$ »,
- «Нагрузка  $F$ -ширина раскрытия трещин  $a_{crc}$ »;

7. Вычисляются значения изгибающих моментов в балке:

а) опытное значение момента трещинообразования

$$M_{crc}^{on} = 0,5 F \cdot L_2,$$

где  $F$ -нагрузка на  $i$ -том этапе, при которой возникли трещины в балке.

$$F = P \cdot \pi \cdot D^2 / 4,$$

где  $P$  – давление рабочей жидкости в домкрата;  $D$  – диаметр поршня домкрата.

Погрешность определения опытного значения момента трещинообразования определяется по формуле

$$\Delta M = 0,5 (DF \cdot L_2 + F \cdot DL_2),$$

где  $DF$ -погрешность измерения нагрузки, равная  $\Delta F = \Delta P \cdot \pi \cdot D^2 / 4 + \Delta D \cdot P \cdot \pi \cdot D / 2$ ,

$\Delta P$  - погрешность измерения давления;  $D$  - диаметр поршня;  $P$  - давление, при котором появляются трещины в балке;  $\Delta D$  - погрешность измерения

диаметра поршня;  $DL_2$  - погрешность измерения расстояния.

б) Опытное значение предельного момента (прочность балки)

$$M_{u^{on}} = 0,5 F_{max} L_2,$$

где  $F_{max}$  - разрушающая нагрузка.

Погрешность определения опытного значения предельного момента вычисляется по формулам:

$$\Delta M = 0,5 (\Delta F_{max} L_2 + F_{max} \Delta L_2),$$

$$\Delta F = \Delta P \cdot \pi \cdot D^2 / 4 + \Delta D \cdot P \cdot \pi \cdot D / 2$$

### 3.1.4. Теоретический расчет экспериментальной балки

**Расчет железобетонной балки по образованию трещин в нормальном сечении**

Расчет балки производится из условия  $M \leq M_{crc}$ ,

где  $M$  – момент внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения;  $M_{crc}$  - момент, воспринимаемый сечением, нормаль-

ным к продольной оси элемента при образовании трещин, определяемый по формуле

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \times W_{pl}$$

где  $R_{bt,ser}$  – расчетное сопротивление бетона для предельных состояний второй группы;  $W_{pl}$  – момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна с учетом неупругих деформаций растянутого бетона.

Собственный вес железобетонной балки в данных расчетах не учитывается.

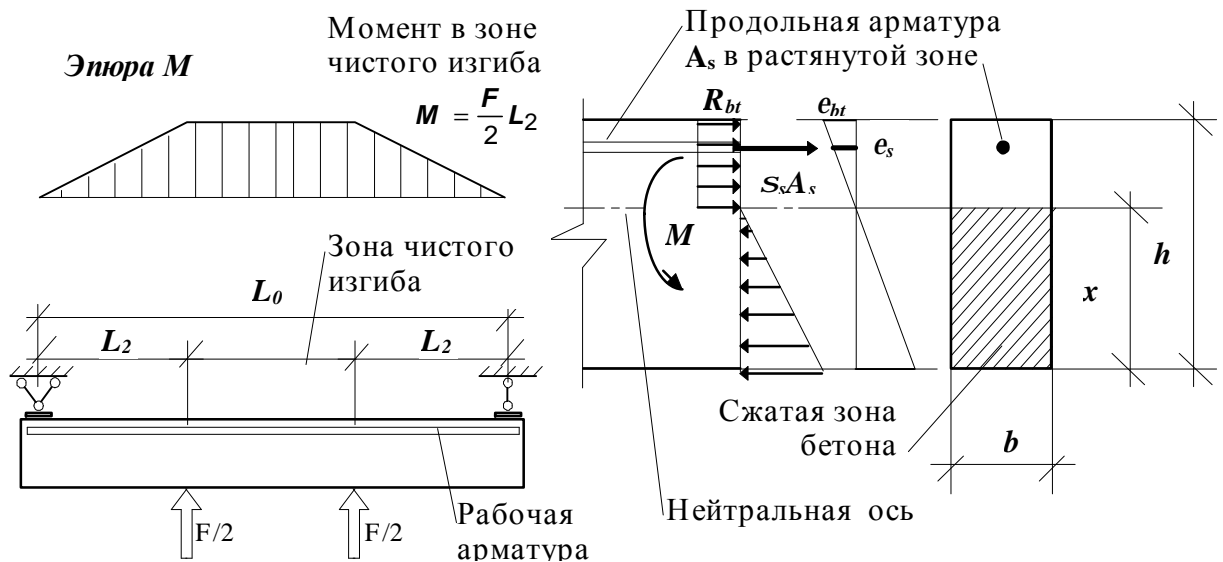


Рис. 3.1.16. Схема усилий в нормальном сечении балки при расчете на образование трещин

Для определения упругопластического момента сопротивления сечения балки вычисляют:

- коэффициент приведения площади арматуры к площади бетона

$$a = E_s / E_b,$$

- площадь приведенного сечения балки  $A_{red} = A_b + a \times A_s,$



- статический момент приведенного сечения относительно оси, проходящей по растянутой грани сечения  $S_{red}=b \times h^2/2+a \times A_s \times a$ ,
- расстояние от центра тяжести сечения до растянутой грани балки

$$y= S_{red}/ A_{red},$$

- момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести  $I_{red}= b \times h^3/12+a \times A_s (0,5 \times h-a)^2$ ,
- момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна сечения балки  $W_{red}= I_{red}/y$ .

Упругопластический момент сопротивления прямоугольного сечения по крайнему растянутому волокну балки равен  $W_{pl}=g \times W_{red}$ ,

где  $g=1,5$  – коэффициент, учитывающий геометрию сечения.

Вычисляется момент образования трещин  $M_{crc}=R_{bt,ser} \times W_{pl}$ .

### Расчет балки по раскрытию нормальных трещин

Ширина раскрытия трещин, нормальных к продольной оси балки, определяется по формуле  $a_{crc}=d \times j_l \times h \times S_s / E_s \times 20 \times (3,5-100 \bar{m}) \sqrt[3]{d}$ ,  
где  $d=1$  – для изгибаемых элементов;  $j_l=1$  – для кратковременных нагрузок;  
 $h=1,3$  – для гладкой стержневой арматуры класса А-I.

Коэффициент армирования сечения балки  $\bar{m} = \frac{A_s}{b \times h_0}$ .

Напряжение в растянутой арматуре  $S_s = S_y \times \frac{M}{M_u}$ ,

где  $M$  – момент в сечении балки при котором определяется ширина раскрытия трещин;  $M_u$  – предельный момент по прочности балки  $M_u=R_b \times b \times x \times (h_0-0,5 \times x)$ .

Высота сжатой зоны бетона определяется из формулы

$$x = S_y \times A_s / R_b \times b.$$

### Расчет железобетонной балки по деформациям

#### Расчет прогибов железобетонной балки без трещин в растянутой зоне

Прогибы балки до образования трещин в растянутой зоне определяется по формуле  $f = \frac{1}{r} \times r_m \times L_o^2$ .

Здесь  $1/r$  – кривизна продольной оси балки до образования трещин в растянутой зоне, определяемая из выражения  $1/r = M \times j_{b2} / j_{b1} \times E_b \times I_{red}$ , где  $M$  – момент от нагрузок, при которых определяется кривизна;  $j_{b2}$  – коэффициент, учитывающий влияние длительной ползучести на деформации ползучести;  $j_{b1}$  – коэффициент, учитывающий влияние кратковременной ползучести бетона и принимаемый для тяжелого бетона – 0,85;  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона;  $I_{red}$  – момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести;  $L_o$  – расчетный пролет балки;  $r_m$  – коэффициент, учитывающий схему загрузки и условия опирания балки.

При расчетах прогибов балки в точках приложения сосредоточенных сил (рис. 3.1.13) коэффициент  $r_m$  принимается равным

$$r_m = \frac{1}{2} \times \frac{L_2}{L_o} - \frac{2}{3} \times \frac{L_2^2}{L_o^2},$$

где  $L_2$  – расстояние от оси опорного шарнира балки до точки приложения сосредоточенных сил.

При  $L_o/h < 10$  расчет прогибов балок производится с учетом деформаций сдвига  $f = 1/r \times r_m \times L_o^2 \times r_q$ ,

где  $r_q$  – коэффициент, учитывающий деформации сдвига, вычисляемый по

$$\text{формуле } r_q = 1 + \frac{j_q}{r_m} \frac{\sigma_h}{L_o} \frac{\sigma^2}{\sigma},$$

где  $j_q = 0,5$  – при отсутствии трещин;  $j_q = 1,5$  – при наличии трещин в сечении балки.

### Расчет прогибов железобетонной балки после образования нормальных трещин

На участках, где в растянутой зоне образуются нормальные к продольной оси балки трещины, кривизна должна определяться по формуле

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{h_o \times z \times E_s \times A_s} + \frac{y_b}{(j_f + x) \times b \times h_o \times E_b \times n},$$

где  $M$  – момент, при котором определяется кривизна балки;  $z$  – расстояние от центра тяжести площади сечения арматуры  $S$  до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне сечения над трещиной (плечо внутренней пары сил).

$$\text{Значение } z \text{ вычисляются по формуле } z = h_o \left( 1 - \frac{\frac{h'_f}{h_o} \times j_f + x^2}{2(j_f + x)} \right), \text{ для изги-}$$

баемых балок прямоугольного сечения с одиночной арматурой  $h'_f = 0; j = 0; l = 0$ .

Относительная высота сжатой зоны в сечении с трещиной определяется по

$$\text{формуле } x = \frac{l}{b + \frac{l + 5(d + l)}{10 \times m \times a}}, \text{ принимается не более } 1,$$

где  $\beta$  – коэффициент, принимаемый для тяжелого бетона равным – 1,8;

$$d = \frac{M}{b \times h_o^2 \times R_{b,ser}}; \quad m \times a = \frac{A_s}{b \times h_o} \times \frac{E_s}{E_b}; \quad y_s - \text{коэффициент, учитывающий}$$

работу растянутого на участке с трещинами и определяемый по формуле

$$\psi_s = 1,25 - \phi_{ls} \cdot \phi_m,$$

где  $j_{ls}$  – коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки. При непродолжительном действии нагрузки, классе бетона В10 и выше и при арматуре класса А-I коэффициент  $j_{ls} = 1$ ;  $j_m = R_{bt,ser} \times W_{pl} / M$ , принимается не более 1,0;  $y_b$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций крайнего сжатого волокна бетона по длине участка с трещинами, для тяжелого бетона  $y_b = 0,9$ ;  $u$  – коэффициент, характеризующий упругопластическое состояние бетона сжатой зоны и принимаемый равным при непродолжительном действии нагрузки – 0,45.

Для изгибаемых элементов из тяжелого бетона постоянного сечения, эксплуатируемых при влажности воздуха окружающей среды свыше 40%, кривизну на участках с трещинами допускается определять по формуле

$$1/r = (M - j_2 \times b \times h^2 \times R_{bt,ser}) / j_1 \times E_s \times A_s \times h_o^2,$$

где  $j_2, j_1$  – табличные коэффициенты, см. табл. 34 [2].

### Расчет железобетонной балки по прочности

Теоретический расчет прочности балки основан на схеме внутренних усилий в сечении, нормальном к продольной оси, в зоне чистого изгиба (рис. 3.1.17)

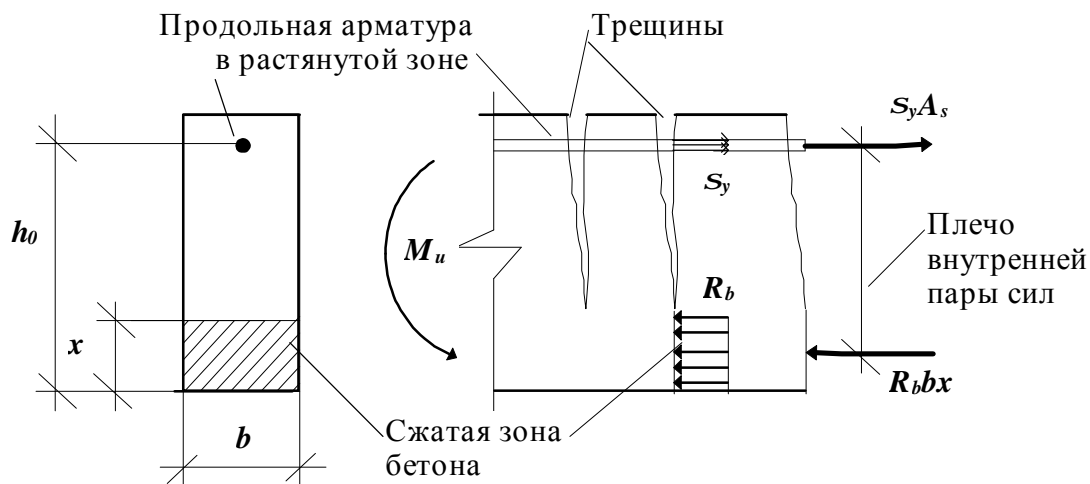


Рис. 3.1.17.

Из условия равновесия продольных сил в нормальном сечении определяется высота сжатой зоны сечения  $x = S_y A_s / R_b b$ ,

где  $S_y$  – напряжения, соответствующие пределу текучести продольной арматуры;  $A_s$  – площадь сечения продольной арматуры;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона на сжатие;  $b$  – ширина сечения балки.

Из условия равенства моментов от внешних нагрузок и внутренних усилий в нормальном сечении относительно оси, проходящей через центр тяжести растянутой арматуры, определяется предельный момент  $M_u = R_b b x (h_0 - 0,5x)$ , где  $h_0$  – рабочая высота сечения балки.

### 3.1.5. Перечень контрольных вопросов и задач

1. Какие задачи решаются при выполнении лабораторной работы?
2. Опишите экспериментальный образец, используемый в лабораторной работе.
3. Опишите устройство испытательного стенда.
4. Каким образом осуществляется загрузка железобетонной балки?

5. Какие измерительные приборы используются при проведении испытаний?
6. Какие геометрические параметры определяются при испытании балки?
7. Какие физико-механические характеристики бетона и арматуры определяются в ходе выполнения лабораторной работы?
8. Как определяются физико-механические характеристики арматуры?
9. Как определяются физико-механические характеристики бетона?
10. Объясните схемы загрузки балки и расстановки измерительных приборов.
11. Объясните последовательность проведения испытаний.
12. Как снимаются показания по приборам (индикаторов и манометров)
13. Как осуществляется наблюдения за появлением и раскрытием трещин в экспериментальном образце?
14. Какими приборами и как определяется ширина раскрытия трещин в железобетонной балке?
15. Опишите три характерные стадии напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, возникающие при загрузении:
  - 1-ая стадия (стадия упругой работы бетона);
  - 2-ая стадия (стадия образования и раскрытия трещин);
  - 3-ая стадия (стадия разрушения);
16. Какие экспериментальные данные заносятся в журнал?
17. Каким образом фиксируются трещины, возникающие в процессе испытания железобетонной балки?
18. Опишите картину образования и раскрытия трещин в железобетонной балке.

19. Объясните динамику разрушения балки по нормальному сечению.
20. Как определяется усилие, создаваемое домкратом?
21. Определите величину изгибающего момента в зоне чистого изгиба на втором этапе загрузки балки.
22. Как определяются опытные значения прогибов балки на каждом этапе загрузки?
23. Какими приборами и как определяются относительные деформации бетона в нормальном сечении балки?
24. Как определяется погрешность измеряемых величин (деформаций, прогибов, нагрузок)?
25. Постройте диаграммы:
  - “ Нагрузка – прогиб балки “;
  - “ Нагрузка – ширина раскрытия трещин “;
  - “ Изгибающий момент – кривизна балки “.
26. Определите экспериментальное значение изгибающего момента при разрушении балки?
27. Определите опытное значение момента трещинообразования.
28. Вычислите теоретическое значение момента образования трещин.
29. Рассчитайте теоретическую прочность железобетонной балки и сравните её с опытным значением.
30. Рассчитайте прогиб балки на одном из этапов и сравните его с экспериментальным значением.
31. Рассчитайте теоретическую ширину раскрытия нормальных трещин на одном из этапов загрузки и сравните её величину с опытным значением.

32. При какой площади продольной арматуры изменится характер разрушения опытной балки по нормальному сечению?
33. Какой из указанных ниже факторов в большей степени повлияет на прочность экспериментальной балки:
- увеличение прочности бетона в 2 раза;
  - увеличение площади арматуры в 2 раза;
  - увеличение высоты сечения балки в 2 раза;
  - увеличение ширины сечения балки в 2 раза;
34. Рассчитайте величину напряжения в растянутой арматуре на предпоследнем этапе загрузки балки и сравните её с  $\sigma_y$ .



### 3.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

#### Испытание железобетонной балки с разрушением по наклонному сечению

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** *Изучение напряженно – деформированного состояния железобетонной балки при изгибе по наклонному сечению.*

В ходе выполнения второй лабораторной работы решаются следующие основные задачи:

- изучение работы балки до и после появления наклонных трещин;
- исследование характера образования и раскрытия наклонных трещин;
- определение экспериментального и теоретического значения поперечных сил, сравнение их величин;
- обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Для балочных конструкций на опорах характерны напряженные состояния, связанные с проявлением деформации сдвига. Разрушение конструкций происходит по сечению наклонному к продольной оси от воздействия поперечной силы и изгибающего момента.

Возможны три случая разрушения изгибаемых элементов:

- разрушение по наклонной сжатой полосе;
- разрушение по наклонной трещине от действия изгибающего момента;
- разрушение по наклонной трещине от действия поперечной силы.

В лабораторной работе исследуется последний случай разрушения железобетонной балки по наклонной трещине от действия поперечной силы.

### Экспериментальный образец

Для проведения второй лабораторной работы используется железобетонная балка прямоугольного сечения, изготовленная из тяжелого бетона, армированная плоским каркасом. Общий вид балки показан на рис. 3.1.1. Рабочая продольная арматура - стержневая диаметром 10 мм класса А-I, поперечная арматура - диаметром 6 мм класса А-I.

Длина балки $L$	120 см
Ширина сечения $b$	8 см
Высота сечения $h$	17 см

### Экспериментальная установка и приборы

Испытание железобетонной балки проводилось на металлическом стенде рис. 3.2.1.

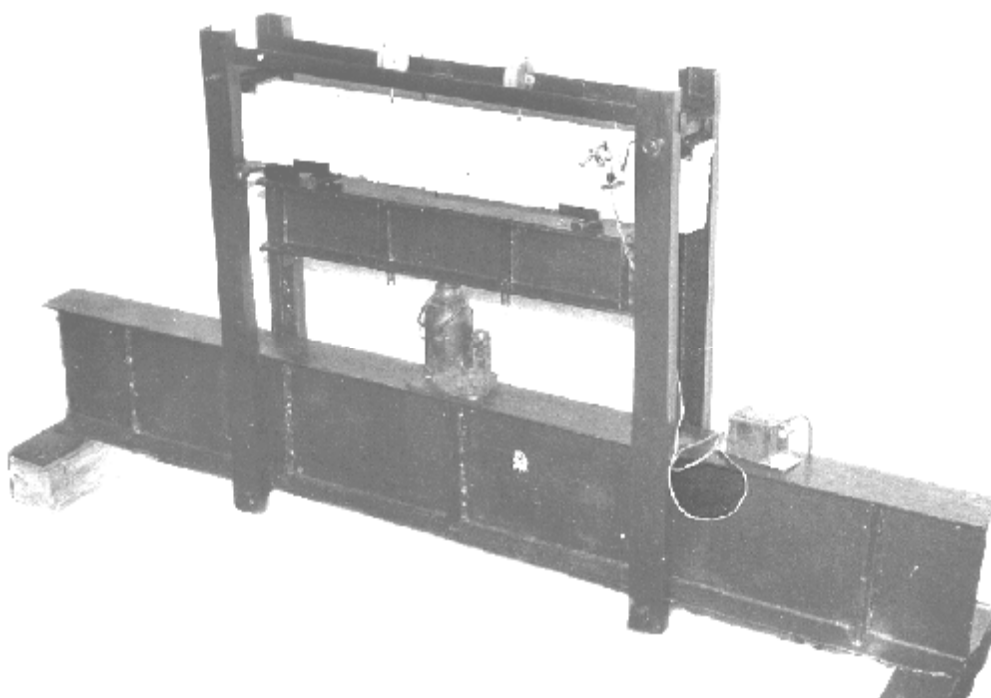


Рис. 3.2.1. Общий вид экспериментального металлического стенда при испытании балки на изгиб с разрушением по наклонному сечению.

Загружение балки осуществляется гидравлическим домкратом ДГ25 с диаметром поршня 100 мм. Измерение длин производится рулеткой; диаметров - штангенциркулем; вертикальные перемещения балки фиксируются индикаторами часового типа ИЧ-25, деформации волокон бетона - тензометрами ТА-2; ширина раскрытия трещин определяется микроскопом - МПБ-3.

### 3.2.1. Проведение лабораторной работы

Схема загрузки экспериментального образца приведена на рис. 3.2.2.

Усилие от гидродомкрата передавалось на балку в двух точках через распределительную траверсу. На участке балки между опорами и точками приложения нагрузки действует поперечная сила (создается зона, где преобладают деформации сдвига).

а)

б)

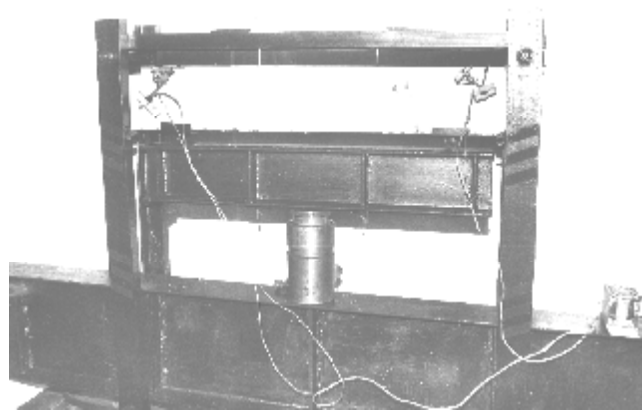
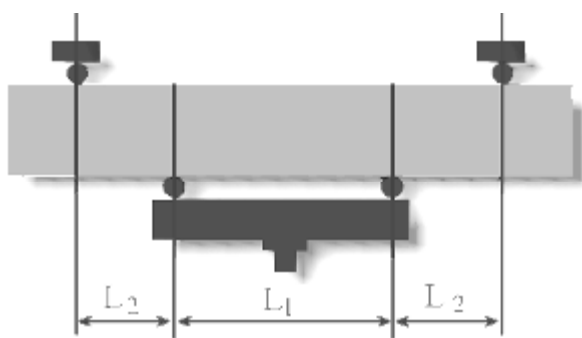


Рис. 3.2.2. Схема загрузки балки (а) и расстановки приборов (б)

До начала испытаний замеряются: расчетный пролет балки  $-L_0$ , расстояние между точками приложения нагрузки  $L_1$ , а также  $L_2$  - от опоры балки до точки приложения нагрузки. Данные заносятся в журнал испытаний.

Экспериментальная балка оснащается приборами для измерения прогибов П1 и П2, деформаций волокон бетона - Т1 и Т2. Расстановка приборов показана на рис. 3.2.3. балку осматривают, зарисовывают начальные (нулевые) трещины и околы

Перед загрузкой бетона. Затем снимают начальные отчеты по прогибомерам П1 и П2, по тензометрам Т1 и Т2 и заносят их в журнал испытаний. При загрузке балки испытательной нагрузкой в ведомость испытаний заносят показания манометра и отсчеты по приборам.

Загрузка балки осуществляется этапами. После каждого этапа нагружения делается выдержка, фиксируются показания приборов, которые заносятся в журнал испытаний, отмечается начало образования наклонных к продольной оси трещин, замеряется ширина их раскрытия и характер разрушения железобетонной балки. Фрагмент разрушения балки по наклонному сечению к продольной оси приведен на рис. 3.2.3.



Рис. 3.2.3. Фрагмент разрушения балки при испытании на изгиб с разрушением по наклонному сечению

### 3.2.2. Обработка экспериментальных данных

Обработка результатов испытаний производится в следующей последовательности :

1. Усилие, создаваемое домкратом, определяется, как произведение величины давления в гидросистеме  $p$  на площадь поршня  $A$

$$F = p \times A.$$

2. Вычисляется поперечная сила в балке

$$Q = 0,5 \times F_i,$$

где  $F_i$  – нагрузка на  $i$ -ом этапе.

3. Прогибы по каждому прогибомеру определяются разностью отсчетов по приборам ( $N_i - N_0$ ), умноженной на цену деления  $\gamma$

$$f_i = (N_i - N_0) \gamma.$$

Величина прогиба балки определяется на каждом этапе как среднее арифметическое прогибов, рассчитанных по показаниям прогибомеров П1 и П2.

4. Относительные деформации растяжения определяются по показаниям тензометров Т1 и Т2 как разность отсчетов по приборам ( $N_i - N_0$ ), умноженной на цену деления  $\Psi$  и поделенным на базу прибора  $K$

$$\varepsilon_i = (N_i - N_0) \Psi / K.$$

Например, для прибора Т1 начальный отсчет равен  $N_0 = 174$ , на первом этапе загрузки  $N_1 = 170$ , цена деления прибора ТА-2  $\Psi = 0,001$ .

Тогда относительные деформации на первом этапе загрузки равняются

$$\varepsilon_1 = (174 - 170) \cdot 0,001 / 150 = - 0,0000266,$$

где  $K = 150$  мм – база измерения удлинений волокон бетона или расстояние между точками опоры тензометра.

Величины  $\varepsilon$  заносятся в табл.4 журнала испытаний.

5. По полученным данным строятся диаграммы:

«Нагрузка  $F$  – прогиб  $f$ »;

«Поперечная сила  $Q$  – ширина раскрытия трещин  $a_{скс}$ ».

6. Устанавливается погрешность измерения нагрузки, соответствующая разрушению балки

$$\Delta Q = \Delta P \times \pi D^2 / 4 + \Delta D \times P \times \pi D / 2,$$

где  $P$  – давление, при котором произошло разрушение балки по наклонному сечению.

Остальные обозначения аналогичны, представленным в первой лабораторной работе.

7. Определяется поперечная сила (прочность балки) с учетом погрешности измерения

$$Q = Q_{\text{н}} + \Delta Q$$

### 3.2.3. Теоретический расчет железобетонной балки

#### Расчет балки по раскрытию наклонных трещин

Ширина раскрытия наклонных трещин при армировании хомутами, нормальными к продольной оси, определяется по формуле

$$a_{crc} = \frac{0,6 \times S_{sw} \times d_w \times h}{E_s \frac{d_w}{h_o} + 0,15 \times E_b \times \left( 1 + 2 \frac{E_s \times A_{sw}}{E_b \times b \times s} \right)},$$

где  $d_w$  – диаметр хомутов;  $S_{sw}$  – напряжение в хомутах, определяемое по

формуле  $S_{sw} = \frac{Q - Q_{b1}}{A_{sw} \times h_o} \leq R_{s,ser}$ ;  $Q$  – поперечная сила в конце наклонного

сечения с проекцией длиной  $c$ ;  $Q_{b1} = \frac{0,8 \times j_{b4} \times R_{bt,ser} \times b \times h_o^2}{c}$ ;  $j_{b4} = 1,5$  для

тяжелого бетона;  $R_{bt,ser}$  – расчетное сопротивление бетона для предельных

состояний второй группы;  $h = 1,3$  – коэффициент для арматуры класса А-I;  $A_{sw}$  – площадь сечения поперечных стержней;  $s$  – шаг хомутов.



### Расчет балки по деформациям

Прогиб балки, обусловленный деформацией изгиба, определяется по

формуле 
$$f_m = \int_0^l \bar{M}_x \times \frac{1}{EI} \times dx,$$

где  $\bar{M}_x$  - изгибающий момент в сечении  $x$  от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения балки в сечении по длине пролета, для которого определяется прогиб;  $\frac{1}{EI}$  - полная величина кривизны элемента в сечении  $x$  от нагрузки, при которой определяется прогиб.

Прогибы балки рассчитываются перемножением эпюры кривизны  $\frac{1}{EI}$  на эпюру моментов  $\bar{M}_x$  от единичной силы, приложенной по направлению прогиба.

Для изгибаемых балок при  $l/h < 10$  учитывается влияние поперечных сил на их прогиб. В данном случае полный прогиб равен

$$f_{tot} = f_m + f_q,$$

где  $f_q$  - прогиб балки от деформаций сдвига.

Прогиб, обусловленный деформацией сдвига, определяется по формуле

$$f_q = \int_0^l \bar{Q}_x \times g_x \times dx,$$

где  $\bar{Q}_x$  - поперечная сила в сечении  $x$  от действия по направлению искомого перемещения единичной силы, приложенной в сечении, в котором определяется прогиб;  $g_x$  - деформация сдвига, определяемая по формуле

$g_x = \frac{1,5 \times Q_x}{G \times b \times h} \times j_{crc}$ ;  $Q_x$  – поперечная сила в сечении  $x$  от действия внешней нагрузки;  $G$  – модуль сдвига бетона, равный  $G=0,4 \times E_b$ ;  $j_{crc}$  – коэффициент, учитывающий влияние трещин на деформацию сдвига:  $j_{crc}=1,0$  – при отсутствии наклонных трещин в сечении балки;  $j_{crc}=4,8$  – при наличии только наклонных трещин в сечении балки.

Прогибы от деформации сдвига рассчитываются перемножением эпюры деформаций сдвига и эпюры поперечной силы от единичной силы, приложенной по направлению прогиба.

### **Расчет прочности балки по наклонному сечению на действие поперечной силы**

Проверяем условие обеспечения прочности бетона на сжатие в полосе между наклонными трещинами

$$Q \leq 0,3 \times j_{w1} \times j_{b1} \times R_b \times b \times h_o,$$

где  $j_{w1} = 1 + 5 \times a \times m_w$  – коэффициент, учитывающий влияние поперечной арматуры;  $a = E_s / E_b$ ;  $m_w = n \times A_{sw} / b \times s$ ;  $n=1$  – количество хомутов в поперечном сечении балки;  $A_{sw}$  – площадь поперечного сечения хомутов;  $S$  – шаг поперечной арматуры.

Проверяем условие  $Q < Q_I$ , если условие выполняется – прочность бетона в наклонной полосе балки обеспечена.

Определяем поперечную силу, воспринимаемую бетоном сжатой зоны

$$Q_b = M_b / c = 2 \times R_{bt} \times b \times h_o^2 / c,$$

где  $c$  – длина проекции наиболее опасного сечения на продольную ось балки.

Длина проекции расчетного наклонного сечения балки, имеющего наименьшую несущую способность

$$c_o = \sqrt{2 \times R_{bt} \times b \times h_o^2 / q_{sw}},$$

где  $q_{sw}$  - усилие в хомутах на единицу длины балки, определяемое по формуле

$$q_{sw} = R_{sw} \times A_{sw} / s_w.$$

Поперечная сила воспринимаемая поперечной арматурой

$$Q_{sw} = q_{sw} \times c_o.$$

Теоретическая прочность балки по наклонному сечению

$$Q_{u, теор} = Q_b + Q_{sw}.$$

### 3.2.4. Перечень контрольных вопросов и задач

1. Перечислите задачи, которые решаются при проведении лабораторной работы.
2. Какие геометрические параметры определяются при испытании железобетонной балки?
3. Опишите схемы загрузки балки и расстановки измерительных приборов.
4. Какие измерительные приборы используются при проведении испытаний? Опишите их устройство.
5. Расскажите в какой последовательности проводятся испытания железобетонной балки.
6. Какие экспериментальные данные заносятся в журнал испытаний?
7. Опишите картину образования и раскрытия трещин на приопорных участках испытываемой балки.
8. Какими приборами и как определяются относительные деформации бетона в наклонных сечениях железобетонной балки?
9. Как определяется экспериментальное значение поперечной силы?

10. Как вычисляется погрешность измерения испытательной нагрузки?
11. Объясните динамику разрушения балки по наклонному сечению.
12. Объясните схему внутренних усилий при разрушении балки по наклонному сечению.
13. Рассчитайте нагрузки при которой образуются наклонные трещины и сравните ее с опытным значением.
14. Рассчитайте напряжение в поперечной арматуре балки на предпоследнем этапе испытания.
15. Рассчитайте ширину раскрытия наклонных трещин на одном из этапов испытаний и сравните ее с опытным значением.
16. Объясните, почему не произошло разрушение испытательной балки по нормальному сечению.
17. Какой из перечисленных факторов окажет большее влияние на прочность балки по наклонному сечению:
  - увеличение площади поперечной арматуры в 1,5 раза;
  - увеличение высоты сечения балки в 1,5 раза;
  - увеличение ширины сечения балки в 1,5 раза.

### 3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### Испытание железобетонной колонны на внецентренное сжатие с большим эксцентриситетом

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** *Изучение напряженно – деформированного состояния внецентренно-сжатого элемента с большим эксцентриситетом.*

В ходе выполнения третьей лабораторной работы решаются следующие основные задачи:

- изучение работы колонны до и после появления нормальных к продольной оси трещин;
- исследование характера образования и развития нормальных трещин;
- исследование характера разрушения колонны;
- определение теоретической и экспериментальной разрушающей силы, сравнение их величин;
- обработка и анализ полученных данных.

Для конструкций колонн характерны напряженные состояния, связанные с проявлением осевых деформаций в растянутой и сжатой зонах поперечных относительно продольной оси. Напряженное состояние описывается условиями совместности деформаций и равновесия.

#### Экспериментальный образец

Для реализации поставленной цели и задач используется железобетонная колонна прямоугольного сечения с уширениями в опорных частях из тяжелого бетона, армированная пространственным каркасом (рис. 3.3.1).

Продольная рабочая арматура в растянутой и сжатой зонах – стержневая класса А-I диаметром 10мм.

Длина колонны	$L$	120 см
Длина участка постоянного сечения	$L_1$	80 см
Ширина сечения	$b$	10 см
Высота сечения	$h$	17 см
Рабочая высота сечения	$h_0$	15 см

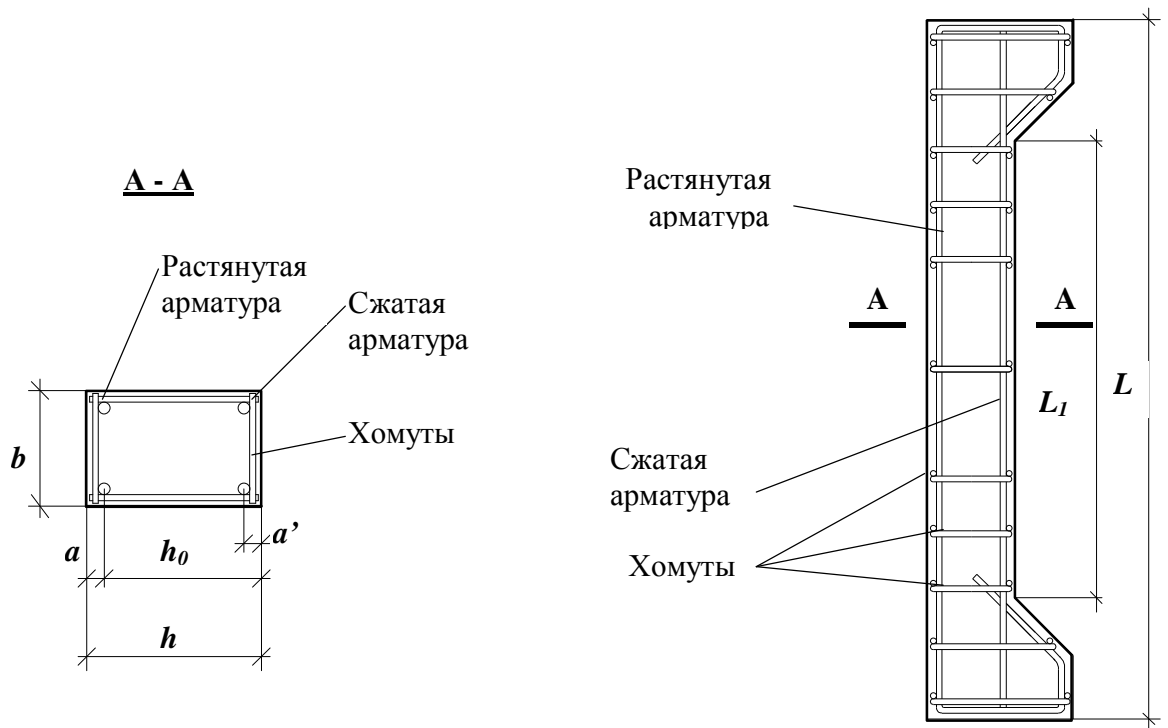


Рис. 3.3.1. Экспериментальный железобетонный образец

### Экспериментальная установка и приборы

Испытание железобетонной колонны производилось на специальном металлическом стенде (рис.3.3.2).

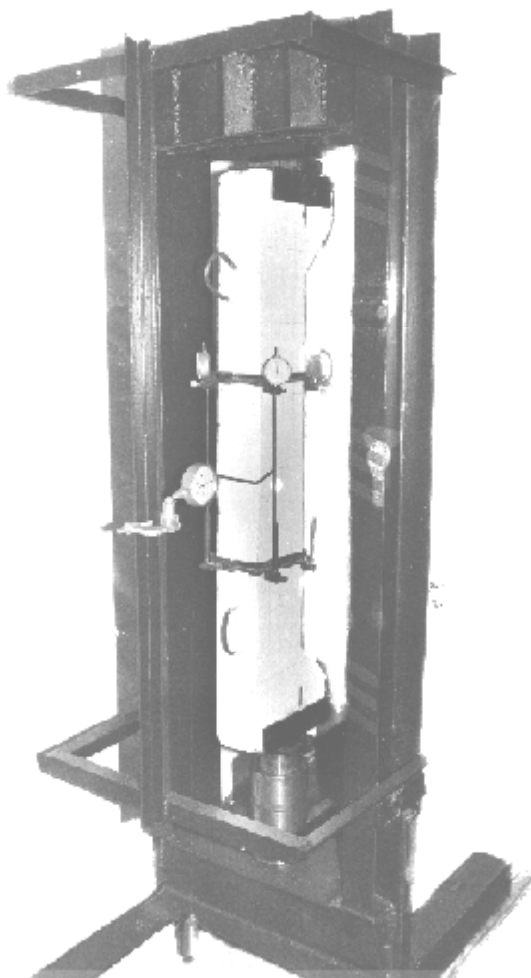


Рис.3.3.2. Общий вид экспериментального металлического стенда при испытании колонны на внецентренное сжатие

Загружение колонны осуществляется гидравлическим домкратом ДГ-25 с диаметром поршня 100 мм.

Измерение длин производится рулеткой; диаметры – штангенциркулем; горизонтальные перемещения (выгиб колонны) определяются прогибомером 6ПАО; относительные деформации сжатия и растяжения – мессурами с индикаторами часового типа ИЧ-10. Для измерения ширины раскрытия трещин применяется микроскоп МПБ-3.

### 3.3.1. Проведение лабораторной работы

Схема загрузки экспериментального образца приведена на рис.3.3.3

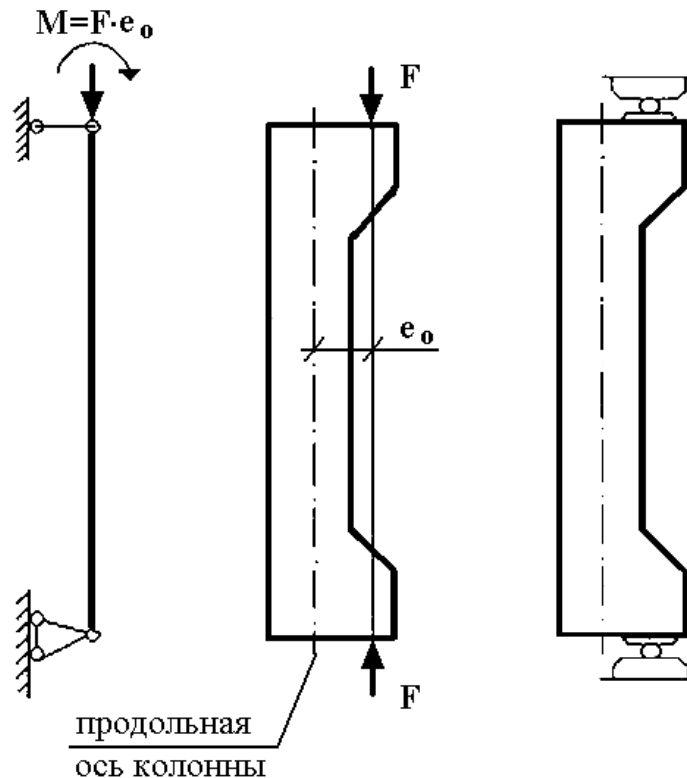


Рис.3.3.3. Схема загрузки колонны

Схема загрузки определяется задачами испытаний. Оси опорных цилиндрических шарниров смещаются относительно геометрической продольной оси колонны на величину  $e_0$ . Эксцентриситет приложения нагрузки превышает размеры радиуса инерции сечения – случай больших эксцентриситетов.

До начала испытаний измеряются: длина колонны  $L$ , длина участка постоянного сечения  $L_1$ , ширина сечения  $b$  и высота колонны  $h$ . Данные заносятся в журнал испытаний. Экспериментальная колонна оснащается приборами для измерения горизонтальных перемещений колонны (выгиба)  $\Pi$ ; относительных деформаций – мессурами с индикаторами часового типа  $M1 \dots M4$ . Расстановка



приборов на натурном образце показана на рис. 3.3.4. При этом фиксируется база измерения деформаций  $K$  и расстояние между растянутыми и сжатыми волокнами  $H$ .

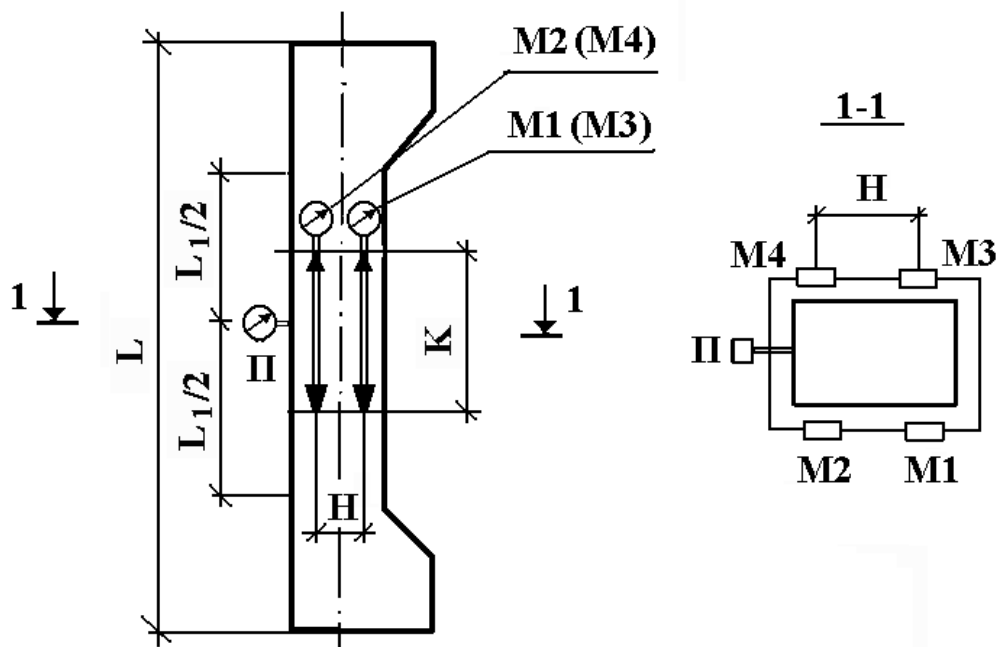


Рис. 3.3.4. Схема расстановки приборов на экспериментальной колонне при испытании колонны на внецентренное сжатие

Перед загрузкой колонну осматривают, отмечают дефекты в бетоне (начальные трещины, околы) и затем снимают начальные отсчеты по прогибомерам и индикаторам и заносят в журнал испытаний.

Загрузка колонны осуществляется этапами. При загрузке колонны испытательной нагрузкой в ведомость испытаний заносятся показания манометра и отсчеты по приборам на каждом этапе загрузки. Отмечается начало образования нормальных к продольной оси трещин и замеряется ширина их раскрытия.

Фрагменты испытаний колонны и разрушения приведены на рис. 3.3.5 – 3.3.6.

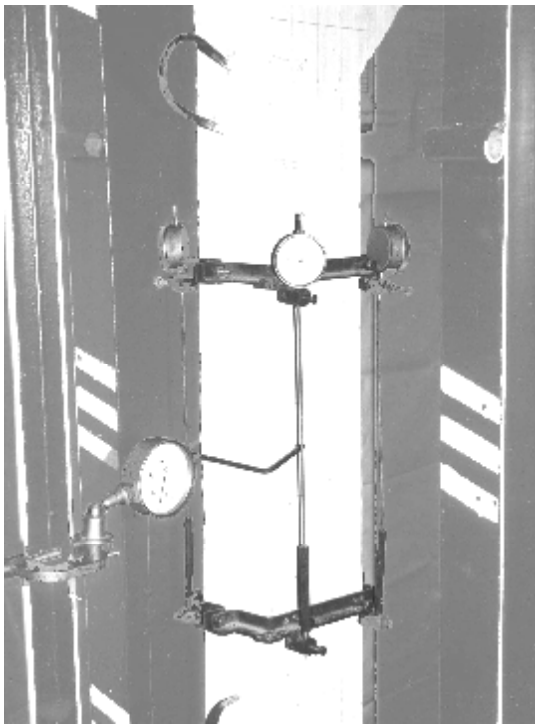


Рис. 3.3.5 Фрагмент испытания колонны на внецентренное сжатие

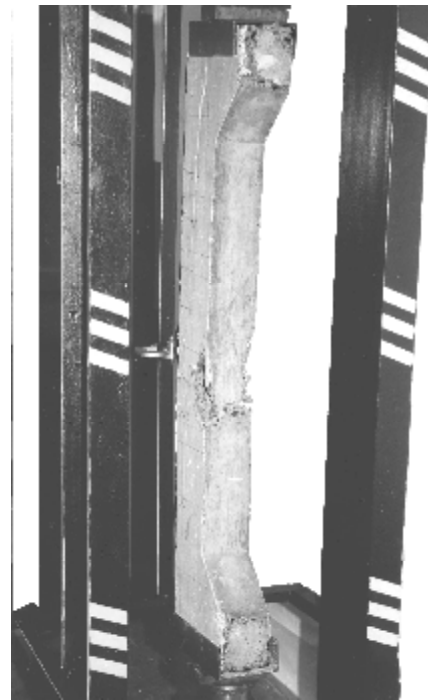


Рис. 3.3.6 Момент разрушения экспериментальной колонны при испытании на внецентренное сжатие

В процессе испытания колонны наблюдаются три стадии напряженно-деформированного состояния в ее нормальном сечении.

В начале загрузки напряжения в бетоне и арматуре невелики. Затем в бетоне растянутой зоны развиваются неупругие деформации. Напряжения приближаются к пределу прочности бетона на растяжение –  $R_{bt}$  (стадия I).

В бетоне в растянутой зоне образуются трещины в начале в середине, а затем по всей длине участка постоянного сечения колонны (стадия II). В местах образования трещин совместность работы бетона и арматуры нарушается.

Высота сжатой зоны сечения постепенно уменьшается, увеличивается ширина раскрытия трещин. Конец стадии II характеризуется началом заметных

неупругих деформаций в растянутой арматуре. Напряжения в растянутой арматуре достигают физического предела текучести. При увеличении выгиба колонны величина эксцентриситета  $e_0$  также увеличивается, т.е. изгибающий момент в колонне возрастает

$$M = F (e_0 + f),$$

где  $f$  – перемещение середины элемента.

Разрушение железобетонной колонны начинается с арматуры растянутой зоны и заканчивается раздроблением бетона сжатой зоны. Разрушение носит пластический характер. После разрушения колонны уточняется диаметр растянутой и сжатой арматуры  $d$  и толщины защитных слоев –  $a$ .

### 3.3.2. Обработка экспериментальных данных

Усилие, создаваемое домкратом, определяется как произведение величины давления в гидросистеме  $p$  на площадь поршня  $A$

$$F = p A.$$

Выгиб колонны вычисляется по разности отсчетов прогибомеров, умноженной на цену деления  $\gamma$

$$f = (N_i - N_0) \gamma$$

Вычисляются относительные деформации растяжения  $e_t$  и сжатия  $e_c$ , являющиеся средними арифметическими деформациями, рассчитанными по показаниям мессур М1, М3 и М2, М4.

Расчеты по показаниям приборов заносятся в табл.4 журнала испытаний.

На основе обработанных данных строится диаграмма " Нагрузка  $F$  – выгиб колонны  $f$  ".

Устанавливается погрешность измерения нагрузки, соответствующая разрушению колонны  $\Delta F = \Delta P \pi D^2/4 + \Delta D P \pi D/2$ ,

где  $P$  – давление, при котором произошло разрушение колонны;

$D, \Delta D, \Delta P$  – обозначения аналогичные лабораторной работе N1, 2.

Фиксируется предельная сила (прочность колонны) с учетом погрешностей измерения.

### 3.3.3. Теоретический расчет

#### Расчет колонны по прочности

Теоретический расчет для оценки прочности колонны основан на схеме внутренних усилий в поперечном сечении. Прочность сжатой части сечения обеспечивается совместной работой бетона и продольной арматуры. Решение уравнений равновесия: сумма проекций всех сил на продольную ось и сумма моментов относительно оси, проходящей через центр тяжести растянутой арматуры, позволяют найти два неизвестных:  $F_u$  – продольную силу;  $x$  – высоту сжатой зоны бетона.

Определяются внутренние усилия в сечении колонны:

$N_s = \sigma_y A_s$  - усилие в растянутой арматуре;

$N_{sc} = \sigma_{sc} A'_s$  - усилие в сжатой арматуре;

$N_b = R_b \cdot b \cdot x$  - усилие в сжатой зоне бетона,

где  $x$  – высота сжатой зоны бетона, равная  $x = F_u / R_b \cdot b$ .

Прочность колонны вычисляется по формуле

$$F_u = \frac{R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5x) + \sigma_y \cdot A'_s (h_0 - a')}{e},$$

где  $e = e_0 + (h/2 - a)$  – эксцентриситет приложения нагрузки  $F$ , относительно растянутой арматуры.

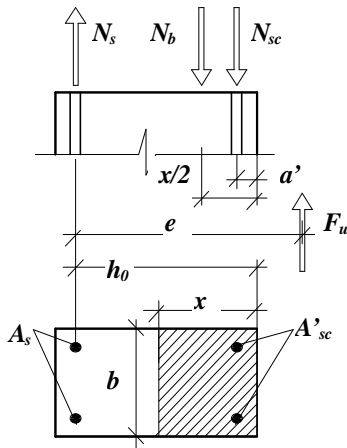


Рис. 3.3.7. Схема распределения усилий в сечении  
колонны

### Расчет колонны по образованию нормальных трещин

Вычисляются характеристики приведенного сечения:

- площадь приведенного сечения колонны

$$A_{red} = A + \alpha(A_s + A_s') = b \cdot h + \frac{E_s}{E_b}(A_s + A_s');$$

- статический момент  $S_{red} = \sum A_i y_i = b \times h \times \frac{h}{2} + \frac{E_s}{E_b}(A_s + A_s')a;$

- расстояние от нижней грани приведенного сечения до центра тяжести

$$y_o = \frac{S_{red}}{A_{red}};$$

- момент инерции  $I_{red} = \sum [I_i + A_i (y_o - y)^2] = \frac{b \times h^3}{12} +$

$$+ b \times h \left( \frac{h}{2} - y_o \right)^2 + \frac{E_s}{E_b}(A_s + A_s')(y_o - a)^2;$$

- момент сопротивления приведенного сечения  $W_{red} = \frac{I_{red}}{y_o}.$

Вычисляется расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки  $r = j \frac{W_{red}}{A_{red}}$ ,

где  $j = 1,6 - \frac{S_b}{R_{b,ser}}$ , при этом  $0,7 < \varphi < 1,0$ ;  $S_b = \frac{F}{A_{red}} + \frac{F \times e_o}{W_{red}}$  - мак-

симальное напряжение в сжатом бетоне, определяемое как для упругого тела.

Определяется момент, воспринимаемый сечением нормальным к продольной оси элемента при образовании трещины

$$M_{crc} = W_{pl} \cdot R_{bt,ser} = g \cdot W_{red} \cdot R_{bt,ser},$$

где  $g$  - коэффициент, зависящий от формы приведенного поперечного сечения.

Теоретическая сила, вызывающая появление трещин  $F_{crc} = \frac{M_{crc}}{e_o - r}$ .

На основе обработки и расчетов производится сравнение экспериментальных и теоретических данных:

расхождение опытного и теоретического значений прочности колонны

$$(F_u^{ex} \pm \Delta F - F_u^{pac}) 100\% / F_u^{pac}$$

### Оценка полученных результатов

Дается анализ результатов, описываются схемы образования и развития трещин, схемы разрушения колонны.

#### 3.3.4. Перечень контрольных вопросов и задач

1. Поясните цель, которая поставлена в лабораторной работе.
2. Какие физико-механические характеристики бетона и арматуры использовались в работе?
3. Как и какие геометрические размеры колонны определяются в работе?

4. Какие исходные и расчетные данные учитываются при расчете прочности колонны?
5. Дайте описание диаграммы “нагрузка - выгиб”.
6. Как из испытания находится предельная величина нагрузки?
7. Опишите схему загрузки и схему расстановки приборов.
8. Опишите схему внутренних усилий при разрушении.
9. На сколько изменится теоретическая прочность колонны, если в 1,5 раза увеличить эксцентриситет продольной силы?
10. Теоретически рассчитайте горизонтальное перемещение среднего сечения колонны на этапе, предшествующем образованию трещин.
11. На одном из этапов, предшествующем образованию трещин, определите относительные деформации крайних волокон в среднем сечении колонны.
12. На сколько процентов изменится теоретическая прочность колонны, если в 2 раза увеличить площадь растянутой продольной арматуры?
13. На сколько процентов изменится теоретическая прочность колонны, если высоту сечения увеличить в 1,5 раза?
14. На сколько процентов изменится теоретическая прочность колонны, если в 2 раза увеличить кубиковую прочность бетона?
15. Рассчитайте ширину раскрытия нормальных трещин на предпоследнем этапе испытания.
16. Определите коэффициент продольного изгиба  $h$ , используя результаты испытаний.
17. Рассчитайте теоретическую прочность колонны при относительной высоте сжатой зоны бетона  $x = x_r \cdot h_0$ .
18. Рассчитайте теоретическую прочность колонны при осевом сжатии.





### 3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

#### Исследование жесткости и трещиностойкости предварительно напряженной балки

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** *Изучение напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной балки в зоне чистого изгиба до и после образования нормальных трещин.*

В ходе выполнения этой лабораторной работы решаются следующие задачи:

- изучение работы балки до появления трещин в растянутой зоне;
- изучение особенности напряженного состояния при образовании трещин;
- определение опытного и теоретического моментов трещинообразования, сравнение их величин;
- определение теоретического момента трещинообразования в балке без предварительного напряжения;
- определение опытного и теоретического значения прогиба балки, сравнение их величин;
- обработка и анализ полученных данных.

#### Экспериментальный образец

Для реализации поставленной задачи используется железобетонная балка прямоугольного сечения из тяжелого бетона, армированная стержневой предварительно напряженной арматурой класса А-IV и пространственными каркасами на опорах (рис. 3.4.1)

Предварительное напряжение в арматуре создается электротермическим способом.

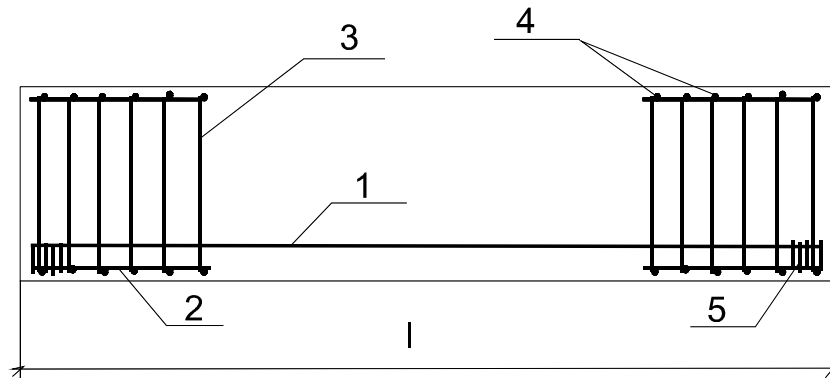


Рис. 3.4.1. Общий вид экспериментальной балки

1 - предварительно напряженная продольная арматура; 2 - продольные стержни каркасов; 3 - поперечные стержни каркасов; 4 - соединительные стержни каркасов; 5 - дополнительное армирование зоны передачи напряжений

Длина балки  $l=138\text{см.}$

Ширина сечения  $b=9\text{см.}$

Высота сечения  $h=18\text{см.}$

### 3.4.1. Проведение лабораторной работы

Прогибы балки фиксируются прогибомером 6ПАО, деформации в растянутой зоне – тензометрами ТА-2. Смещение концов предварительно напряженного арматурного стержня относительно бетона контролируется с помощью индикаторов часового типа ИЧ-10. Ширина раскрытия трещин определяется микроскопом МПБ-3. Схема нагружения экспериментального образца показана на рис.3.4.2

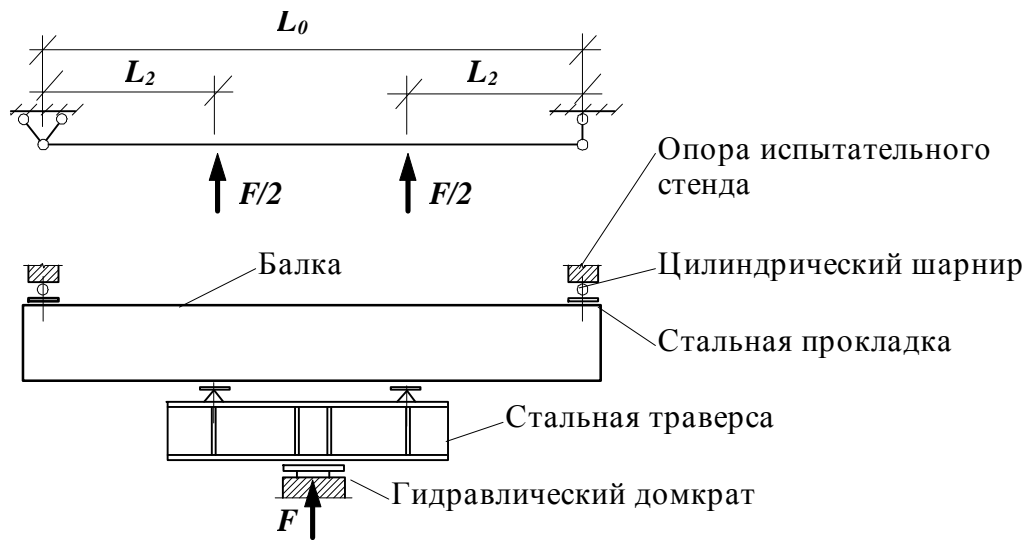


Рис.3.4.2. Схема загрузки балки

Испытание предварительно напряженной железобетонной балки проводится на экспериментальном стенде рис.3.4.3

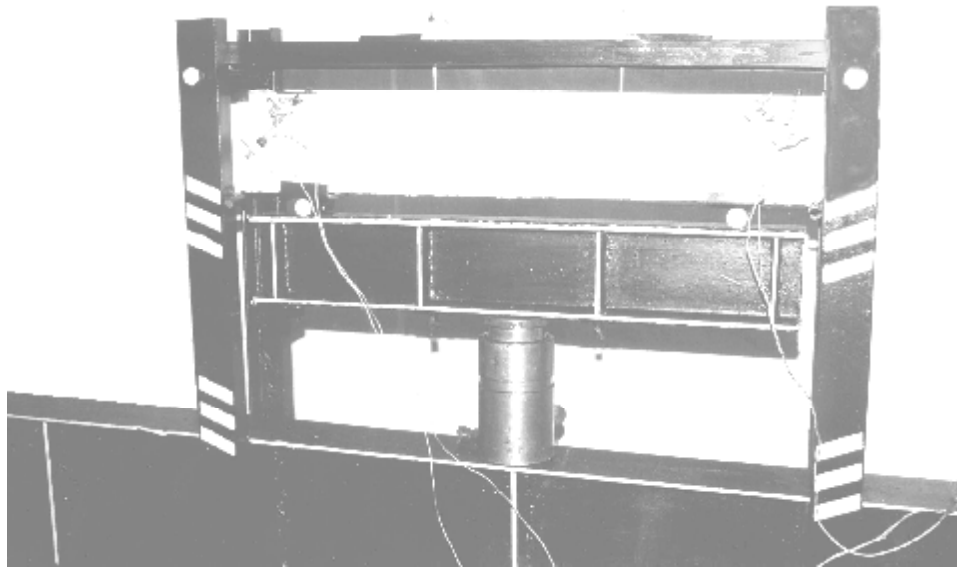


Рис.3.4.3. Общий вид экспериментального стенда

Усилие от гидравлического домкрата к балке передается в двух точках через распределительную траверсу. На участке балки между парой сосредоточенных сил создается зона чистого изгиба, в которой изучаются деформативные свойства железобетона. Перед загрузением балку осматривают, отмечают начальные трещины, измеряют следующие параметры:

$L_0$  -расчетный пролет балки;

$L_1$  -расстояние между точками приложения нагрузки;

$L_2$  -расстояние от опоры до точки приложения нагрузки и прогибомеров.

Данные заносятся в журнал испытаний.

Экспериментальная балка оснащается приборами для измерения прогибов – П1 и П2; деформаций – Т1 и Т2; смещения концов рабочей арматуры И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub>. Расстановка приборов приведена на рис.3.4.4.

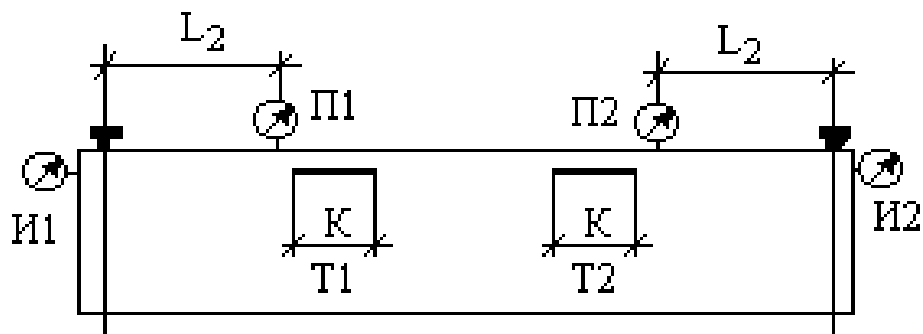


Рис.3.4.4. Схема расстановки приборов на экспериментальной балке

В процессе испытания на каждой ступени загрузки в ведомость записываются показания манометра и отсчеты по приборам. Отмечается начало образования трещин, измеряется ширина раскрытия трещин.

### 3.4.2. Обработка экспериментальных данных

Обработка результатов эксперимента производится в следующей последовательности:

1. Определяется изгибающий момент в зоне чистого изгиба

$$M=0,5F_iL_2 ,$$

где  $F_i$  – нагрузка на этапе загрузки, кН;  $L_2$  – расстояние от опор до точки приложения силы, м.

2. Величина прогибов определяется по формуле

$$f_i=(N_i-N_0)g ,$$

где  $N_i$  – показания приборов на  $i$ -ом этапе загрузки;  $N_0$  – начальные показания прибора;  $g$  – цена деления прибора.

3. Относительные деформации бетона определяются по показаниям тензометров T1 и T2

$$e_i=(N_i-N_0)g / K ,$$

где  $N_i$  – показания тензометров на  $i$ -ом этапе загрузки;  $N_0$  – начальные показания тензометров;  $g$  – цена деления тензометра, мм;  $K$  – база измерения деформаций, мм.

4. Строятся диаграммы «Нагрузка  $F$  – прогиб  $f$ » и «Изгибающий момент  $M$  – ширина раскрытия трещин  $a_{cre}$ ».

5. По показаниям индикаторов **И1** и **И2** контролируется совместная работа стержневой арматуры периодического профиля в зоне передачи напряжений.

6. Вычисляется погрешность измерения **DF, DM, Df.**

### 3.4.3. Теоретический расчет

Теоретическое значение момента образования трещин **M** и прогиба балки в середине пролета **f** вычисляются после определения геометрических характеристик сечения и расчета потерь предварительного напряжения в арматуре.

Для определения напряжения в сечении предварительно напряженной балки в первой стадии НДС рассматривают приведенное сечение, в котором площадь сечения арматуры заменяют эквивалентной площадью сечения бетона. При этом определяют следующие характеристики.

Площадь приведенного сечения

$$A_{red} = A_b + aA_{sp} = bh + aA_{sp},$$

где  $A_b$  - площадь прямоугольного сечения балки,  $см^2$ ;  $A_{sp}$  - площадь поперечного сечения предварительно напряженной арматуры,  $см^2$ ;  $a = E_s / E_b$  – отношение модулей упругости арматуры и бетона.

Статический момент площади приведенного сечения относительно растянутой грани

$$S_{red} = S_b + aS_s = bh^2 / 2 + aA_{sp} a_s,$$

где  $b$  и  $h$  – ширина и высота экспериментальной балки,  $см$ ;  $a_s$  – расстояние от центра тяжести предварительно напряженной арматуры до нижней грани сечения,  $см$ .

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до его растянутой грани

$$y = S_{red} / A_{red}.$$

Момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести

$$J_{red} = bh^3 / 12 + aA_{sp} (h / 2 - a_s)^2.$$

Момент сопротивления приведенного сечения

$$W_{red} = J_{red} / y.$$

Упругопластический момент сопротивления (с учетом неупругих деформаций бетона)

$$W_{pl} = gW_{red} = 1,75W_{red}.$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны

$$r = 0,8 W_{red} / A_{red}.$$

Предварительное напряжение в напрягаемой арматуре назначается с учетом допустимых отклонений  $p$ . Значение допустимых отклонений при электротермическом способе натяжения арматуры определяется по формуле

$$p = 30 - 360 / l,$$

где  $p$  – имеет размерность, Мпа;  $l$  - расстояние между наружными гранями упоров, м.

Начальное предварительное напряжение арматуры  $A_{sp}$  назначается с учетом выполнения следующих условий:

$$S_{sp} + p \leq R_{s,ser} ; S_{sp} - p \geq 0,3 R_{s,ser}.$$

Определяются потери предварительного напряжения в арматуре.

### Первые потери

$\sigma_1$  - от релаксации напряжений в арматуре при электротермическом способе натяжения стержневой арматуры  $\sigma_1 = 0,03 \sigma_{sp}$ .

$\sigma_2$  - от деформации анкеров, расположенных у натяжных устройств. При электротермическом способе натяжения  $\sigma_2 = 0$ , так как они учтены при определении значения полного удлинения арматуры.

$\sigma_6$  - от быстронатекающей ползучести бетона, подвергнутого тепловой обработке

$$\sigma_6 = 0,85 \cdot 40 S_{sp} / R_{bp}$$

$$\text{при } \sigma_{bp} / R_{bp} \leq a;$$

$$\sigma_6 = 0,85 [ 40a + 85b ( S_{bp} / R_{bp} - a ) ] \quad \text{при } \sigma_{bp} / R_{bp} > a,$$

где  $\sigma_{bp}$  - напряжение обжатия бетона на уровне центра тяжести продольной арматуры  $A_{sp}$  с учетом потерь  $\sigma_1$  и  $S_2$ ;  $R_{bp}$  - передаточная прочность бетона ( прочность бетона к моменту его обжатия ) назначается не менее 11 МПа ( для стержневой арматуры класса А IV) и не менее 50% «В» принятого класса бетона по прочности на сжатие;  $a$  и  $b$  - коэффициенты, принимаемые

$$a = 0,25 + 0,025 R_{bp}, \text{ но не более } 0,8;$$

$$b = 5,25 - 0,185 R_{bp}, \text{ но не более } 2,5 \text{ и не менее } 1,1.$$

Напряжение обжатия бетона  $\sigma_{bp}$  определяется из выражения

$$\sigma_{bp} = A_{sp} (S_{sp} - S_1) / A_{red} + A_{sp} (S_{sp} - S_1) (y - a_s) y / J_{red}.$$

Первые потери определяются по формуле

$$S_{los1} = S_1 + S_6.$$

### Вторые потери

$S_8$  - от усадки тяжелого бетона , подвергнутого тепловой обработке.

Класс

B35 и ниже - = 35 МПа;

B40 - = 40 МПа;

B45 и выше - = 50 МПа.

$\sigma_9$  - от ползучести бетона

$$\sigma_9 = 150a S_{bp} / R_{bp} \quad \text{при } \sigma_{bp} / R_{bp} \leq 0,75;$$

$$\sigma_9 = 300a (S_{bp} / R_{bp} - 0,375) \quad \text{при } \sigma_{bp} / R_{bp} > 0,75,$$



где  $a$  - коэффициент, принимаемый равным для бетона подвергнутого тепловой обработке – 0,85;  $\sigma_{bp}$  - напряжение обжатия бетона на уровне центра тяжести арматуры с учетом первых потерь  $\sigma_{los1}$

$$\sigma_{bp} = A_{sp} (S_{sp} - S_{los1}) / A_{red} + A_{sp} (S_{sp} - S_{los1}) (y - a_s) y / J_{red}.$$

Вторые потери равны

$$\sigma_{los2} = S_8 + S_9.$$

Полные потери равны

$$\sigma_{los} = S_{los1} + S_{los2}.$$

Определяется усилие предварительного обжатия

$$P = A_{sp} (S_{sp} - S_{los}).$$

Вычисляются значения теоретических моментов трещинообразования

- в преднапряженной балке

$$M_{crc} = R_{bt, ser} W_{pl} + P (y - a_s + r);$$

- в балке без предварительного напряжения арматуры

$$M'_{crc} = R_{bt, ser} W_{pl} = R_{bt, ser} 1,75 W_{red}.$$

Сравниваются величины теоретического момента образования трещин  $M_{crc}$  и моментом образования трещин  $M'_{crc}$  в балке без предварительного напряжения.

Вычисляются значения прогибов  $f$  и кривизны  $1/r$ .

В преднапряженной балке

$$f = r_m \times r_q \times (1/r_1 - 1/r_2) L_0^2 = r_m \times r_q \times (M/0,85 E_b J_{red} - (P \times e_{op})/0,85 \times E_b \times J_{red}) L_0^2,$$

где  $e_{op} = y - a_{sp}$  - эксцентриситет усилия  $P$  относительно центра тяжести приведенного сечения;  $r_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_2}{L_o} - \frac{2}{3} \cdot \frac{L_2^2}{L_o^2}$  - коэффициент, учитывающий схему загрузки и условия опирания балки;  $r_q = 1 + \frac{j_q}{r_m} \left( \frac{h}{L_o} \right)^2$  - коэффициент, учитывающий влияние деформации сдвига при  $L_o/h < 10$ ;  $\phi_q = 0,5$  - при отсутствии трещин в балке.

В балке без предварительного напряжения арматуры

$$f = r_m \times r_q (M / 0,85 \times E_b \times J_{red}) L_o^2.$$

Сравниваются опытное и теоретическое значение прогиба балки, сопоставляются значения опытных и теоретических значений прогибов балок с напрягаемой и ненапрягаемой арматурой, оцениваются отклонения их величин. На основе сопоставления опытных и теоретических данных делаются выводы. В заключении отражаются результаты визуальных наблюдений за образованием и развитием трещин, приводятся результаты сопоставления основных параметров, дается объяснение их расхождения.

#### 3.4.4. Перечень контрольных вопросов и задач

1. Поясните цели, которые поставлены в лабораторной работе.
2. Какие физико-механические характеристики арматуры и бетона используются в настоящей работе? Как они определялись?
3. Как и какие геометрические размеры балки и схемы испытания определяются в лабораторной работе?
4. Какие исходные и расчетные данные использованы при расчете момента трещиностойкости?

5. Какие исходные и расчетные данные использованы при расчете предельного изгибающего момента?
6. Какие исходные и расчетные данные использованы при расчете прогиба балки?
7. Дать описание диаграммы «Нагрузка-прогиб».
8. Как по результатам испытания определяется прочность балки?
9. Опишите схему загрузки балки и расстановки приборов.
10. Какие потери предварительного напряжения арматуры учитываются в данном испытании?
11. Рассчитайте опытное и теоретическое значение изгибной жесткости балки перед образованием нормальных трещин.
12. Теоретически рассчитать ширину раскрытия нормальных трещин на одном из этапов испытания.
13. Объясните влияние предварительного напряжения на трещиностойкость в нормальных сечениях балки.
14. Какой из перечисленных факторов в большей мере отразится на трещиностойкости балки:
  - уменьшение прочности бетона в 1,5 раза;
  - уменьшение площади арматуры в 1,5 раза;
  - уменьшение высоты сечения в 1,5 раза;
  - уменьшение ширины сечения в 1,5 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Испытание сборных железобетонных конструкций Учебное пособие для студентов вузов /Комар А.Г., Дубровин Е.Н., Кержнеренко Б.С., Заленский В.С. –М.: Высшая школа, 1980.- 269 с., ил.
2. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения (к СНИП 2.03.01-84)/ ЦНИИпромзданий, НИИЖБ Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 192 с.
3. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНИП 2.03.01-84), /ЦИТП Госстроя СССР, - М., 1988.
4. СНИП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции.-М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 79с.
5. *Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс: Учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп.-М.: Стройиздат, 1991. -767с.*
6. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы испытания на прочность. - М.: Изд-во стандартов, 1989. 25с.
7. ГОСТ 12004-81\*. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. - М.: Изд-во стандартов, 1982. 15с.