

На правах рукописи

МИХАЙЛОВА Наталья Сергеевна

**ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ОРГАНИЗОВАННЫМИ
ТРЕЩИНАМИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2008

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Митасов Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
заслуженный деятель науки
и техники РФ
Абовский Наум Петрович

доктор технических наук, профессор
Плевков Василий Сергеевич

Ведущая организация: ОАО Сибирский зональный научно-
исследовательский и проектный
институт СИБЗНИИЭП

Защита состоится « 20 » июня 2008 г. в « 14⁰⁰ » часов на заседа-
нии диссертационного совета ДМ 212.099.08 при федеральном госу-
дарственном образовательном учреждении высшего профессиональ-
ного образования «Сибирский федеральный университет» по адресу:
660049, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, ИГУРЭ СФУ,
аудитория К – 120.
Тел. (8-3912) 52-78-68, факс (8-3912) 52-78-68,
e-mail: end-lev@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
градостроительства, управления и региональной экономики Сибир-
ского федерального университета

Автореферат разослан «19» мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е.В. Пересыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном строительстве основным конструкционным материалом является железобетон. Изучение механизма деформирования железобетонных конструкций необходимо для повышения эксплуатационной надежности, долговечности, в том числе при особых сочетаниях нагрузок. В связи с этим вопросы, затрагиваемые в данной работе, являются весьма **актуальными**.

Строительные нормы и правила по расчету железобетонных конструкций допускают эксплуатацию конструкций по трем категориям трещиностойкости с видимыми невооруженным глазом трещинами, ограничивая ширину их раскрытия. При этом классическая теория сопротивления железобетона не позволяет построить единообразного подхода к оценке прочности, жесткости и трещиностойкости, а конкретные прогнозы появления трещин строятся на полуэмпирических и эмпирических результатах и в ряде случаев значительно отличаются от фактического трещинообразования. Это связано с тем, что в растянутой зоне трещины образуются стохастически, т.е. место и время их появления прогнозировать весьма сложно.

В исследованиях, проводимых на кафедре ЖБК НГАСУ (Сибстрин), предложен диаграммно-энергетический подход, на основе которого удалось создать модели «сквозного» расчета, т.е. прочность, жесткость и трещиностойкость определяется единой системой уравнений. Однако в этих моделях переход из состояния сплошности к трещинам также рассмотрен для неупорядоченного трещинообразования. Образование трещин влияет на жесткость и деформативность конструкций (элементов), поэтому возникает необходимость дальнейшего совершенствования расчетного аппарата для сближения расчетных и фактических значений прогибов и параметров трещинообразования.

Цель работы: анализ и корректировка теоретических результатов энергетической теории сопротивления железобетона путем выявления особенностей деформирования балок сплошного сечения и с организованными трещинами для последующего перехода к регулированию трещинообразования.

Задачи исследований:

- разработать методику проведения эксперимента с целью определения прогибов изгибаемых элементов на различных этапах нагружения для балок, изготовленных по обычной технологии и с организованными трещинами, под действием кратковременной нагрузки;
- на основе эксперимента и исследований проанализировать и провести статистическую обработку распределения значений и закономерностей изменения деформаций и перемещений для разных типов балок при системе сосредоточенных сил;
- разработать предложения по дальнейшему усовершенствованию теории сопротивления железобетона, в том числе и в энергетической постановке в соответствии с полученными результатами для балок с организованными трещинами.

Средства исследования. Для решения поставленных задач использованы физические модели элементов балочного типа. Измерение деформаций и прогибов производили с помощью тензорезисторов 2 ПКБ – 20 –200А с базой 20 мм, измерительной тензометрической системы «СИИТ-3», индикаторов многооборотных с ценой деления 0,01 и 0,001 мм, прогибомеров Аистова с ценой деления 0,01мм, кататометр В-630.

Для статистической обработки показаний тензорезисторов и прогибомеров использованы пакет SPSS 13.0 и Microsoft Office Excel 2003. Для построения эпюр деформаций и напряжений использован пакет AutoCAD 2006.

Все экспериментальные исследования сопровождались видео и фотосъемкой. Состояние разрушения в исследованиях не рассматривали.

Теоретическо-методологической основой исследования является диаграммно-энергетический метод, предложенный проф. В.М. Митасовым и получивший дальнейшее развитие в работах кафедры железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин).

Научная новизна работы:

1. Разработана методика эксперимента, позволившая сопоставить результаты деформирования обычных балок без преимущественно напряженной арматуры при кратковременной на-

грузке со стохастически образующимися трещинами и балок с организованными трещинами при двух способах нагружения.

2. Результаты статистической обработки экспериментальных данных подтвердили возможность использования гипотезы о линейном распределении деформаций по высоте сжатой зоны при изгибе железобетонных балок до и после образования трещин.

3. Экспериментально подтверждена гипотеза о динамическом характере стохастического трещинообразования.

4. Предложен метод расчета жесткости и трещиностойкости для балок с организованными трещинами по методологии действующих норм.

5. Предложен способ изготовления изгибаемых железобетонных элементов с организованными трещинами. Их исследование позволяет перейти от оценки стохастически образующихся трещин к проектированию элементов с частично заданным процессом трещинообразования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований по определению деформаций и прогибов для обычных конструкций и конструкций с организованными трещинами при изгибе.

2. Результаты статистической обработки экспериментальных данных.

3. Анализ особенностей деформирования балок с организованными трещинами.

4. Предложения по уточнению методов расчета жесткости и трещиностойкости для балок с организованными трещинами.

Достоверность и надежность результатов обеспечена использованием официально поверенных приборов и оборудования, определением для каждой серии балок прочности сжатия и растяжения физическими испытаниями эталонных кубов, призм и восьмерок, достаточной по объему выборкой результатов измерения, позволившей провести статистическую обработку для сопоставления результатов расчета и физического эксперимента.

Личный вклад автора. Автору принадлежат постановка задачи, разработка методики и проведение физического модельного эксперимента, изготовление железобетонных образцов

сплошного сечения и с организованными трещинами, разработка методики измерения и фактическая расстановка измерительных приборов, организация и проведение физических испытаний до разрушения простым статическим нагружением со ступенями, фиксацией деформаций и прогибов на каждой ступени приложения нагрузки, статистическая обработка результатов и формулировка основных положений, определяющих научную новизну.

Практическая значимость. Результаты и рекомендации выполненной работы позволяют перейти от прогнозирования вариантов трещинообразования при нагружении к предварительно регулируемому процессу, а также упрощают расчетный аппарат при проектировании и повышают надежность, безаварийную эксплуатацию конструкций при минимальных затратах.

Результаты исследований используются в спецкурсах по кафедре железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин) для студентов старших курсов и аспирантов. Получен патент на полезную модель. Результаты исследования были использованы при обследовании и экспертизе поврежденных конструкций зданий и сооружений, выполняемых специалистами ООО НИП-ТиПЦ «Сибстройреконструкция» и ООО НПЦ «Сибстройэкспертиза».

Апробация результатов исследования. Основные решения работы и результаты исследования были представлены на 63-ей, 64-ой и 65-ой научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск, 18 апреля 2006 года, 10 апреля 2007 года, 8 апреля 2008 года). Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных академических Чтениях «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 17 сентября 2006 года, 29 сентября 2007 года), на секции 4.2. «Вопросы проектирования и строительства. Конструкции сейсмостойких зданий, основания и фундаменты» VII Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (Сочи, 29 августа 2007 года).

В полном объеме работа докладывалась на семинаре лаборатории арматуры НИИЖБа (Москва, 27 сентября 2007 года), на совместном заседании кафедры «Зданий» ПГУПС и научно-технической секции «Динамики и сейсмостойкого строительст-

ва» при НТО Стройиндустрии г. Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург, 28 сентября 2007 года), на научном семинаре кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ (Томск, 9 октября 2007 года), на научном семинаре кафедры железобетонных конструкций с участием специалистов кафедры строительной механики НГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск, 4 октября 2007 года), на расширенном заседании кафедры железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск, 12 мая 2008 года).

Публикации. Результаты исследования представлены в 8 публикациях, включая патент на полезную модель и статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (181 источник) и 6 приложений общим объемом 294 страниц, в том числе 175 рисунка, 10 фотографий, 116 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена информация об апробации результатов исследования.

В первой главе «Анализ литературных источников» освещено состояние вопроса трещинообразования. Одна из проблем деформирования железобетона – раннее образование трещин в растянутой зоне.

Практика показывает, что появление трещин в растянутой зоне неизбежно. Однако это еще не является признаком опасного состояния конструкции, т.к. раскрытие трещин обычно ограничено допустимой величиной, не вызывающей снижения прочности и долговечности, а также нарушения нормальной эксплуатации.

Изучению этих и смежных проблем были посвящены работы Н.П. Абовского, В.В. Адищева, Г.Н. Албаут, Ф.Х. Ахметзянова, О.В. Байдина, В.Н. Байкова, С.Х. Байрамукова, Р.О. Бакирова, В.А. Барышникова, В.М. Баташева, В.Я. Бачинского, Н.И. Безухова, Г.И. Бердичевского, Э.В. Березиной, Ю.Ф. Бирулина, В.М.

Бондаренко, В.П. Васильева, П.И. Васильева, Г.М. Власова, З.Р. Галяутдинова, П.Н. Ганаги, А.А. Гвоздева, Г.А. Гениева, С.В. Гутеневой, Ю.П. Гущи, С.А. Дмитриева, Л.В. Енжиевского, Е.В. Ершевой, А.В. Ермаковой, Н.В. Ершовой, А.С. Залесова, В.С. Здоренко, Л.Ф. Ильина, Н.И. Карпенко, А.А. Карякина, А.Д. Кауфмана, В.И. Колчунова, А.А. Котова, Л.Ш. Килимника, А.Ю. Кубасова, В.И. Кудашева, О.Г. Кумпяка, И.Ю. Ларичева, Л.Н. Лемьша, В.П. Леньшина, М.П. Леонтьева, С.Е. Лисичкина, А.Ф. Лолейта, И.И. Лучко, Л.П. Макаренко, Б.Я. Мартянова, И.В. Матвеева, В.Н. Мигунова, В.М. Митасова, В.П. Митрофанова, В.В. Михайлова, К.В. Михайлова, В.И. Мурашева, Т.А. Мухамедиева, А.И. Никулина, А.В. Носарева, В.И. Осидзе, Е.Н. Панькова, Е.Н. Пересыпкина, С.Н., Пересыпкина, В.С. Плевкова, Г.И. Попова, Ю.В. Починок, Е.М. Сергуничевой, Г.А. Смоляго, В.М. Сурдина, Д.В. Талантова, В.С. Уткина, Л.В. Уткина, М. Харуна, С.Ю. Цейтлина, В.П. Чиркова, В.И. Шевченко, Г.Н. Шоршнева, Г.П. Яковленко, А.Ф. Яременко, P. Aagren, Z.P. Bazant, Q. Chen, A. Cij-unaitis, Q. Huang, V. Jokubaitis, W. Peng, H.W. Reinhard, R. Shionaga, S. Somayaji, M.A. Sozen, Z. Sun, M. Xia, Z. Yang и др.

В теории железобетона распространена модель, основанная на понятии расчетного сечения. Как правило, рассматривается состояние сечения до и после образования трещины. При этом широко используется эмпирический и полуэмпирический подходы при решении расчетных задач в железобетоне.

Расширение границ применения железобетона все сильнее требуют дальнейшего совершенствования методов расчета железобетонных конструкций. Отсутствие единообразия в расчетах прочности, жесткости и деформирования конструкций с трещинами, обилие эмпирических коэффициентов, детерминированный подход к использованию нормированных величин, отсутствие научно обоснованного прогноза поведения конструкции при изменении свойств исходных материалов – все это становится препятствием дальнейшего развития методов расчета железобетона.

По мнению проф. В.М. Митасова внезапное образование трещины сопровождается мгновенным изменением напряженного состояния в сечении конструкции; процесс этот носит динамический характер.

Известно, что не представляется возможным определить точное положение и время образования трещин в железобетоне – об этом еще в 50-гг. прошлого века писал проф. В.И. Мурашев. Таким образом, лучше было бы научиться контролировать место и время появления трещин, т.е. ввести элементы регулирования трещинообразованием, как, например, в своих трудах разработал проф. Н.П. Абовский по отношению к напряженно-деформированному состоянию конструкции.

В данном исследовании автором сделана такая попытка по отношению к процессу образования и развития трещин в балках для того, чтобы перейти к более простым решениям и получить надежный прогноз дальнейшего развития деформаций в конструкциях.

Во второй главе «Экспериментальные исследования железобетонных балок без трещин и с организованными трещинами» описан проведенный модельный эксперимент по испытанию пяти серий. В каждой серии изготовлены три балки. Призмы, кубы и восьмерки, входящие в серии, выполнены в соответствии с ГОСТ. Геометрические размеры балок показаны на рис. 1.

Все образцы изготовлены из мелкозернистого бетона с проектным классом В20. Фактический класс бетона определяли на момент испытаний. Арматура класса А-III (А 400) диаметром 8 мм.

Опирание балок – шарнирное со свободным перемещением одной из опор вдоль оси элемента. Статическая нагрузка прикладывалась с помощью гидродомкрата ДГ – 10 ступенями по 100 и 200 кгс.

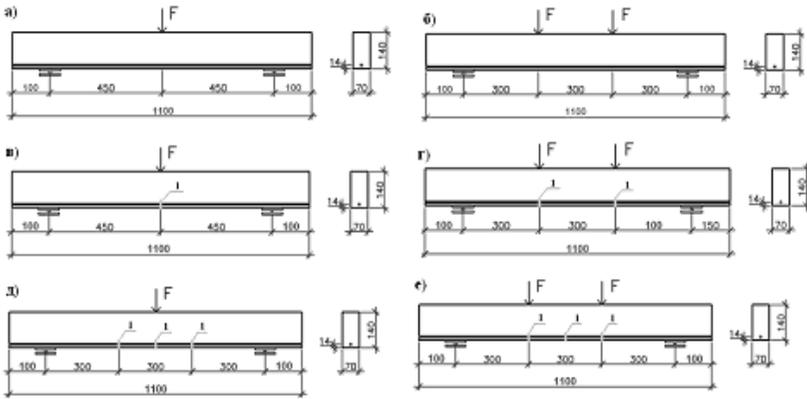


Рис. 1. Схемы железобетонных балок и приложения нагрузки
а) – серия № 1 без начальных трещин; б) – серия № 2 без начальных трещин; в) – серия № 3 с одной организованной трещиной; г) – серия № 4 с двумя организованными трещинами; д), е) – серия № 5 с тремя организованными трещинами; I – организованная трещина

Для регистрации прогибов использовали прогибомеры Аистова с точностью 0,01мм. Осадки опор измеряли при помощи индикаторов многооборотных часового типа (ИЧ) с точностью 0,01мм. Относительные деформации фиксировались тензорезисторами 2 ПКБ – 20 – 200А с базой 20 мм с помощью измерительной тензометрической системы «СИИТ-3» и индикаторами многооборотными часового типа (ИЧ) с точностью 0,001мм и базой 260 мм, а на нижней поверхности балки – с базой 80 мм при действии одной сосредоточенной силы и 260 мм при действии двух сил. Нулевые отсчеты по приборам снимались непосредственно перед началом нагружения.

Схема расстановки механических приборов и расклейки тензорезисторов представлена на рис. 2а и 2б на примере балки серии № 1 без начальных трещин, испытанной на действие одной сосредоточенной силы.

На фото 1 показаны испытания балок.

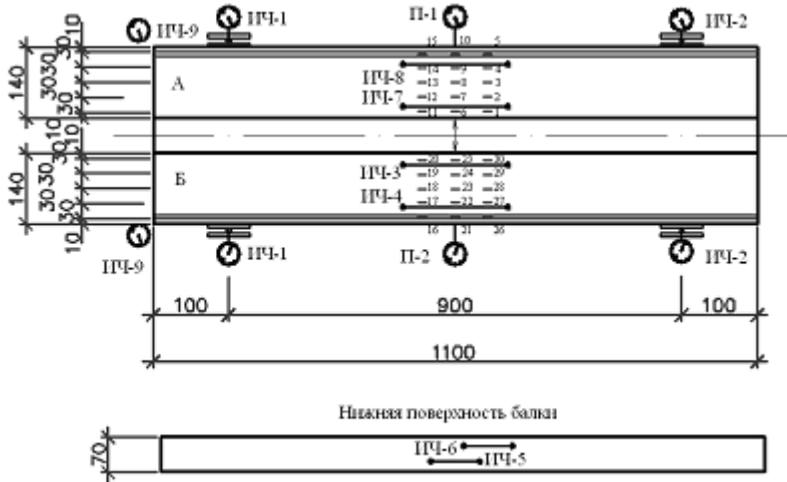


Рис. 2а. Схема расположения индикаторов и тензорезисторов на балке серии № 1 (без организованной трещины)

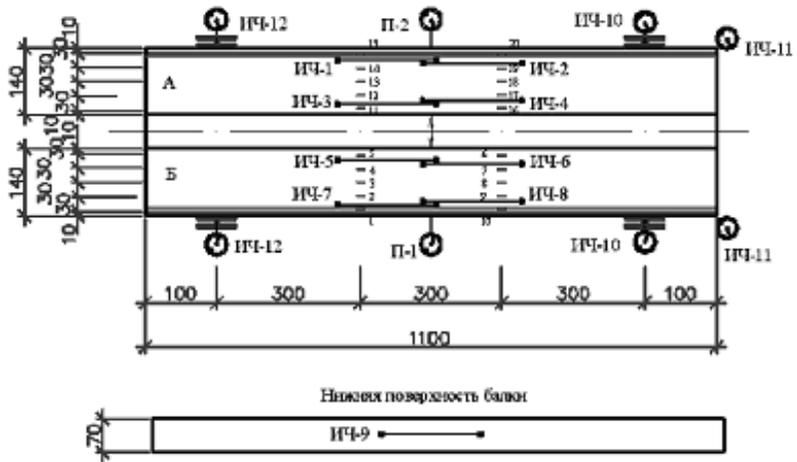


Рис. 2б. Схема расположения индикаторов и тензорезисторов на балке серии № 2 (без организованной трещины)

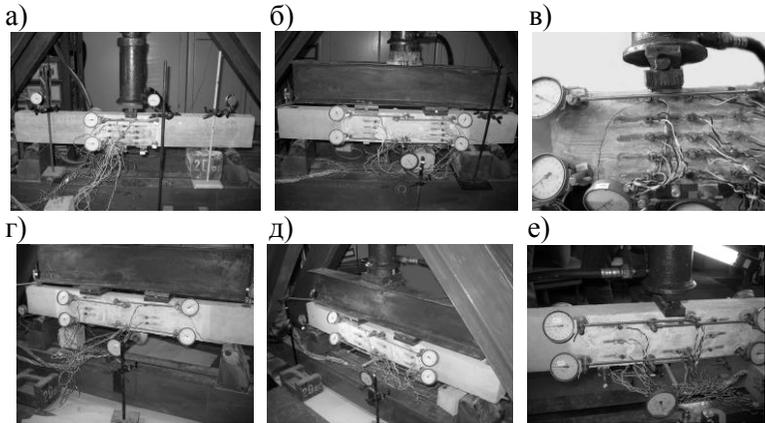


Фото 1. Испытание балок
 а) – серия №1; б) – серия №2; в) – серия №3; г) – серия №4;
 д), е) – серия №5

В процессе проведения эксперимента измерены деформации в сжатой и растянутой зонах. Для каждого этапа нагрузки в каждой балке построены эпюры деформаций. На рис. 3 представлено распределение деформаций по высоте сечения на примере балки серии № 4.

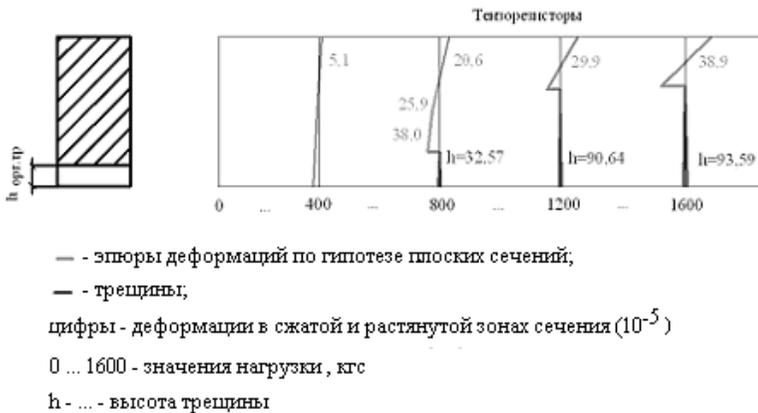


Рис. 3. Эпюры деформаций на примере балки серии № 4

После обработки экспериментальных данных построены диаграммы деформирования бетона по результатам испытания призм и восьмерок; графики прогибов для балок, испытанных на действие одной сосредоточенной силы (рис. 4) и двух сил (рис. 5). Для построения графиков использована серия № 6¹.

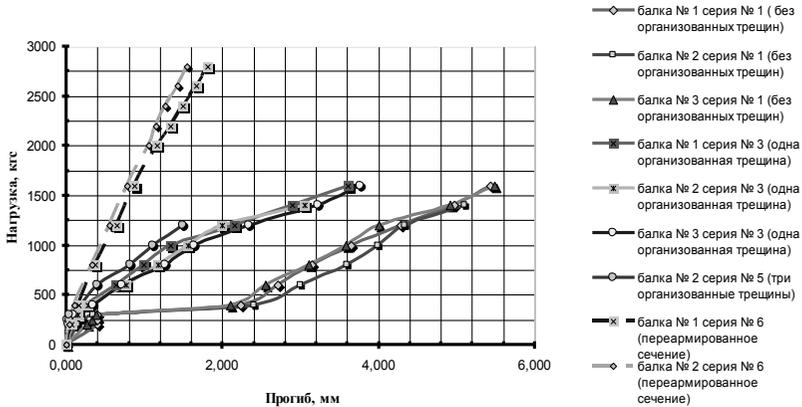


Рис. 4. Зависимость прогиба от нагрузки (одна сосредоточенная сила)

Из графиков видно, что прогибы балок с организованной трещиной развиваются плавно, без резких скачков. В балках без начальных трещин в момент трещинообразования резко увеличивается прогиб, что говорит о динамическом характере поведения системы.

¹ — серия № 6 (балки с переармированным сечением ($\mu = 3\%$)) изготовлена и испытана совместно с инж. Ю.В. Пичкуровым. Результаты использованы только для оценки прогибов балок и сравнения полученных результатов с балками других серий.

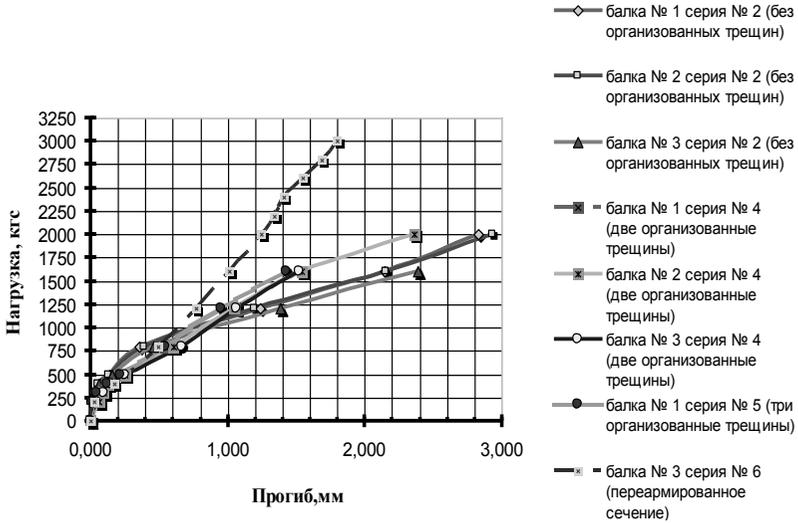


Рис. 5. Зависимость прогиба от нагрузки
(две сосредоточенные силы)

Таблица 1
Сравнение среднего прогиба для балок, испытанных на действие одной сосредоточенной силы

	Нагрузка, кгс	Прогиб, мм f_i, f_j^2	Отношение f_i/f_j
Серия № 1	1200	4,21	
Серия № 3	1200	2,16	1,95
Серия № 5	1200	1,495	2,82

² — f_i — прогиб для балок сплошного сечения (серия № 1); f_j — прогиб для балок с организованными трещинами (серии №№ 3, 5).

Таблица 2

Сравнение среднего прогиба для балок, испытанных на действие двух сосредоточенных сил

	Нагрузка, кгс	Прогиб, мм f_i, f_j^3	Отношение f_i/f_j
Серия № 2	1200	1,272	
Серия № 4	1200	1,055	1,21
Серия № 5	1200	0,95	1,34
Серия № 2	1600	2,225	
Серия № 4	1600	1,53	1,45
Серия № 5	1600	1,425	1,56

Впоследствии, после образования первой трещины, развитие прогиба балок, изготовленных по обычной технологии, и балок с начальными трещинами различно – в балках с организованными трещинами из-за отсутствия динамического эффекта деформативность ниже, что видно из таблиц 1 и 2.

В третьей главе «Статистический анализ полученных результатов» представлена статистическая обработка показаний тензорезисторов, полученных в результате испытания одной и двумя сосредоточенными силами. При статистической обработке были построены линейные и нелинейные регрессионные зависимости двух типов:

1 тип – зависимость деформаций сжатой зоны от нагрузки (для всех пяти серий);

2 тип – уравнения распределения деформаций для сжатой зоны по высоте сечения при различных этапах нагружения (для четырех первых серий).

Регрессионные уравнения построены в предположении нормального закона распределения.

На рис. 6 показан характер распределения деформаций от

³ – f_i – прогиб для балок сплошного сечения (серия № 2); f_j – прогиб для балок с организованными трещинами (серии №№ 4, 5).

нагрузки для балок серий №№ 1, 3, 5 в сечении 2 (в месте приложения одной сосредоточенной нагрузки).

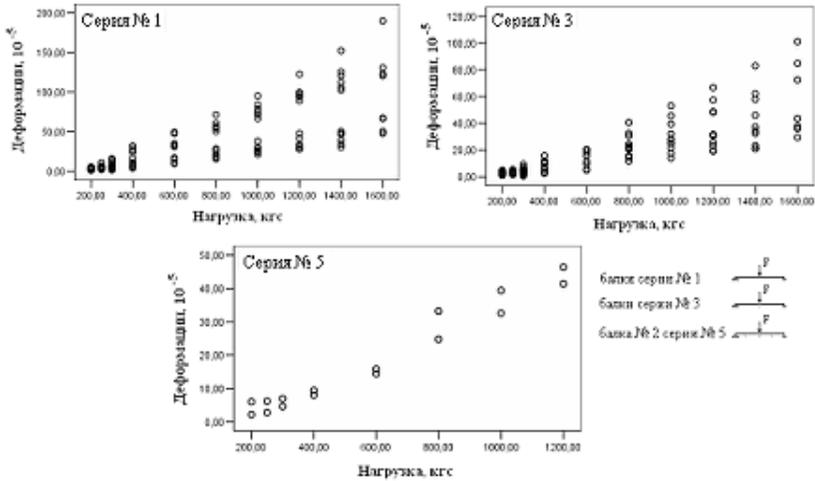


Рис. 6. Характер распределения значений деформаций от нагрузки в сечении 2 балок серий №№ 1, 3, 5

Из рис. 6 видно, что существенный разброс значений деформаций для балок серии № 1 начинается после нагрузки 300 ... 400 кгс, т.е. после образования первой трещины. Разброс значений деформаций для балки серии № 3 увеличивается также после нагрузки 300 ... 400 кгс. Для балки № 2 серии № 5 доверительный интервал значений деформаций по сечениям уже, по сравнению с балками серий №№ 1 и 3, и значения деформаций в балке серии № 5 примерно в 3 раза меньше, чем в балках серии № 1 и в 1,5 раза – чем в балках серии № 3.

По результатам испытаний серий балок при действии одной сосредоточенной силы установили следующее:

- с увеличением нагрузки увеличивается разброс значений деформаций;
- после образования первой трещины в балках сплошного сечения резко увеличивается развитие деформаций;

- разброс значений деформаций с увеличением числа организованных трещин уменьшается;

- с увеличением нагрузки гипотеза плоских сечений в целом выполняется для нагрузок вплоть до контрольных (условно эксплуатационных); в стадии предразрушения и разрушения не удалось построить регрессионные зависимости при принятых предпосылках. Косвенным подтверждением этого является обилие полуэмпирических и эмпирических коэффициентов при расчете по нормативным документам;

- развитие деформаций в балках с организованными трещинами происходит более мягко, и чем больше организованных трещин, тем плавней график зависимости деформаций от нагрузки.

Анализ распределения деформаций по высоте сечений для всех серий свидетельствует о том, что при условно эксплуатационных нагрузках и нагрузках в стадии предразрушения линейная регрессионная зависимость для балок без начальных трещин недостаточно точна, а наиболее хорошо закон распределения деформаций описывает полиномиальная (3-й степени) модель. В балках же с организованными трещинами линейный закон правомерен.

В результате статистической обработки получены значения высоты сжатой зоны и максимальные деформации в сжатой зоне для всех характерных этапов нагружения при использовании линейной и кубической моделей.

В табл. 3, 4 на основе линейной модели для балок, испытанных на действие одной сосредоточенной силы, приведены значения высоты сжатой зоны и максимальные деформации в сжатой зоне по данным тензорезисторов.

В четвертой главе «Анализ результатов и определение параметров жесткости и трещиностойкости для балок с организованными трещинами» рассмотрены уравнения энергетической теории сопротивления железобетона для расчета железобетонных конструкций со стохастически образующимися трещинами и предложена их корректировка для балок с организованными трещинами.

Таблица 3

Сравнение значений высоты сжатой зоны по линейной модели, мм

Нагрузка, кгс	Серия № 1			Серия № 3
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3	Среднее по результатам
200	- 65,93	80,46 78,75	97,4 -	88,07 72,34
300	64,52 -	52,14 58,33	59,57 65,07	59,73 61,70
400	51,27 -	56,62 47,86	47,35 60,00	51,75 53,93
800	49,14 -	55,00 35,41	49,56 57,84	51,23 57,84
1200	47,71 -	48,67 -	48,18 56,77	48,19 56,77
1600	46,79 -	51,75 -	54,31 55,51	50,95 55,51

Таблица 4

Сравнения значений деформаций по линейной модели

Нагрузка, кгс	Серия № 1			Серия № 3
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3	Среднее по результатам
200	- 0,000031	0,000050 0,000041	0,000046 -	0,000048 0,000036
300	0,000076 -	0,000132 0,000077	0,000146 0,000050	0,000118 0,000064
400	0,000290 -	0,000318 0,000144	0,000281 0,000084	0,000296 0,000114
800	0,000703 -	0,000702 -	0,000627 -	0,000677 -

	-	0,000370	0,000251	0,000311
1200	0,001216	0,001318	0,001160	0,001231
	-	-	0,000391	0,000391
1600	0,001726	0,00185	0,001518	0,001699
	-	-	0,000554	0,000554

В рамках этой теории предложен единый расчет трещиностойкости, жесткости и прочности на всех этапах нагружения с использованием диаграмм деформирования арматуры и бетона. В трактовке профессоров В.М. Митасова и В.В. Адищева одной из гипотез этой теории является гипотеза о мгновенном переходе из одного состояния в другое в момент образования трещины. Переход сопровождается затухающими колебаниями балки.

В момент образования трещины в сечении обычных конструкций происходит перераспределение усилий. Энергия деформирования растянутого бетона переходит в кинетическую энергию, процесс сопровождается «динамическим» прогибом. При максимальном его значении обратимая часть энергии переходит на арматуру. Почти мгновенное образование трещины порождает динамику процесса перераспределения усилий в сечении — на острие динамически подросшей трещины достигаются наибольшие напряжения и деформации растянутого бетона. Затем под действием упругих сил в арматуре трещина частично закрывается, ее высота уменьшается, колебания затухают. Это состояние соответствует уравниванию работы внешней нагрузки на соответствующих перемещениях и работой внутренних сил.

Полученные результаты вписываются в общую систему уравнений диаграммно – энергетического метода и позволяют упростить эту систему, из которой выделим уравнения перераспределения энергии растянутого бетона с учетом динамического характера образования трещины и уравнения баланса плотности энергии.

Уравнение для определения наибольших напряжений в момент образования трещины (использованы решения проф. С.Г. Тимошенко)

$$\int_{\sigma_s^*}^{\sigma_s^d} \sigma \varphi'(\sigma) d\sigma = \sigma_s^{st} \left(\epsilon_s^d - \epsilon_s^* \right) \quad (1)$$

Для двузначной эпюры напряжений уравнение баланса плотности энергии, учитывающее работу внешних сил на дополнительном смещении элемента после образования трещины принимает следующий вид:

$$W_{bt} + W_b + \delta A_k = W_{bt}^d + W_b^d + \Delta W_s^d + \Delta W_T \quad (2)$$

где $\delta A_k = b \int_0^L P(z) \delta u(z) dz$ – приращение плотности энергии в се-

чение с трещиной за счет работы внешних сил на дополнительном смещении, связанным с мгновенным трещинообразованием.

Сложностью применения данного метода расчета является наличие перемещения в момент образования трещины, которое неизвестно.

При организованных трещинах расчетный аппарат упрощается ввиду того, что динамические колебания отсутствуют, а характер развития деформаций смягчен. Тогда, учитывая, что $W_T = \Delta V_{bt}$, уравнение (1) упростится до вида:

$$A_s \int_{\varepsilon_s^*}^{\varepsilon_s^{st}} \sigma_s d\varepsilon = A_s \int_{\sigma_s^*}^{\sigma_s^{st}} \bar{\sigma} (d\bar{\varepsilon}) d\bar{\sigma} = \Delta \bar{W}_T^y \quad (3)$$

Для практического определения прогибов, ширины раскрытия трещин и их количества в балках с организованными трещинами предложен метод расчета. На основе полученных в результате статистической обработки значений высоты сжатой зоны и максимальных деформаций в сжатой зоне можно записать в рамках общепринятой теории сопротивления железобетона уравнения для определения прогибов (4), ширины раскрытия трещин (5).

$$f = s \times \ell^2 \times \psi_b \times \frac{M}{D} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{crc} = \psi_b \times \frac{M \times \ell_{crc}}{W_{pl} \times E_b} \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n a_{crc} = k_1 \times a_{crc1} + k_2 \times a_{crc2} + \dots + k_n \times a_{crcn}$.

Уравнение (5) позволяет контролировать количество необ-

ходимых трещин. При обработке экспериментальных данных ширина раскрытия трещин принята изменяющейся по тому же закону, что и момент от внешней нагрузки.

Ниже приведены сравнительные результаты, полученные по вышеприведенным формулам и экспериментальным результатам. В табл. 5 приведены сравнительные результаты по определению кривизны и прогибов для балок с одной организованной трещиной, испытанных на действие одной сосредоточенной силы (при $\psi_b = 0,9$).

Таблица 5

Сравнительные результаты по определению жесткости балок

нагрузка, (кгс)	σ_b , (кгс/см ²)	$1/r$, (1/см)	ψ_s	I_{red} , (см ⁴)	$f_{теор}$, (см)	$f_{экс}$, (см)
200	10,00	$0,50 \times 10^{-5}$	0,3	975,32	0,010	0,006
300	20,00	$1,04 \times 10^{-5}$	0,4	710,52	0,018	0,010
400	32,00	$2,05 \times 10^{-5}$	0,5	619,87	0,031	0,028
800	90,00	$5,38 \times 10^{-5}$	0,5	338,63	0,148	0,147
1200	112,00	$6,89 \times 10^{-5}$	0,7	320,18	0,221	0,216
1600	154,00	$10,27 \times 10^{-5}$	0,8	274,49	0,370	0,369

Характер изменения деформаций для балок с организованными трещинами показывает, что прогиб можно уменьшить, управляя трещинообразованием, вместо постановки дополнительной арматуры.

В **заключении** представлены основные результаты проведенного исследования.

В **приложениях** приведены таблицы значений, полученных при испытании кубов, призм, восьмерок и балок, эпюры распределения деформаций для каждого выделенного сечения. Также в приложении приведены таблицы и графики, полученные при статистической обработке.

Основные результаты проведенного в работе исследова-

ния:

1. Разработана методика и проведен эксперимент для сравнительной оценки поведения балок, изготовленных по обычной технологии и с организованными трещинами, под действием кратковременной нагрузки.

2. Проведенный анализ прогибов изгибаемых элементов на конкретных примерах силового воздействия подтвердил факт снижения кратковременного прогиба при организованных трещинах в среднем в 2,5 раза при действии одной сосредоточенной силы по оси симметрии балки и в 1,3 раза при действии двух сил.

3. Сформированы уравнения регрессий и выявлены закономерности распределения значений деформаций балок по высоте сечения в балках, изготовленных по обычной технологии и с организованными трещинами, на разных этапах нагружения.

4. Проведен анализ характера распределения деформаций с помощью статистического исследования. Анализ этих результатов показал, что при стохастическом образовании трещин сложно построить точную аналитическую модель изгибаемых элементов под нагрузкой; для конструкций с организованными трещинами такая возможность установлена.

5. Выявленные эффекты деформирования балок с организованными трещинами позволили внести изменения в систему уравнений энергетической теории сопротивления железобетона, что, в целом, упростило аналитическое решение задачи.

6. В рамках существующей теории сопротивления железобетона, на которой основаны современные нормы, предложена методика определения прогибов, шага и ширины раскрытия трещин. Выполненная по данной методике серия расчетов показала хорошую сходимости результатов с опытными данными и наличие резервов жесткости и трещиностойкости для конструкций с организованными трещинами.

Публикации по теме диссертации:

1. Михайлова Н.С. Динамика образования трещин в изгибаемых элементах /В.М. Митасов, В.В. Адищев, Н.С. Михайлова, Ю.В. Пичуров // Тезисы докладов 63-й Научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 35.

2. Михайлова Н.С. Анализ деформирования системы «анкер-втулка-шпур» с учетом влияния сил трения / В.В. Адищев, В.М. Митасов, Н.С. Михайлова // Тезисы докладов 63-й Научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 36.

3. Михайлова Н.С. Новый метод расчета железобетона с учетом его реальных свойств / В.М. Митасов, В.В. Адищев, Н.С. Михайлова // Материалы Международных академических чтений 16-19 сентября 2006 г. – Курск, 2006. – С 115 – 119.

4. Михайлова Н.С. Трещиностойкость железобетонных балок без трещин и с заранее замоделированной трещиной / В.М. Митасов, В.В. Адищев, Н.С. Михайлова, Ю.В. Пичкуров // Тезисы докладов 64-й Научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2007. – С. 18-19.

5. Михайлова Н.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок без трещин и с заранее намеченной трещиной / Н.С. Михайлова // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 117 – 120.

6. Михайлова Н.С. Напряженно-деформированное состояние железобетонной балки с трещиной / В.М. Митасов, Н.С. Михайлова // Материалы Международных академических чтений 27-29 сентября 2007 г. – Курск, 2007. – С. 104 – 108.

7. Михайлова Н.С. Особенности деформирования железобетонных балок с организованными трещинами / В.М. Митасов, В.В. Адищев, Н.С. Михайлова // Тезисы докладов 65-й Научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2008. – С. 16-17.

8. Пат. 67603 Россия, МПК E04C 3/00, E04C 3/20. Железобетонный строительный элемент / В.М. Митасов, Н.Н. Пантелев, В.В. Адищев, Н.С. Михайлова (Россия). – 2007122109/22; Заявлено 13.06.2007; Опубл. 27.10.2007 Бюл. № 30.

