

На правах рукописи

ДОРОДНЫХ АННА АЛЕКСЕЕВНА

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ
ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН
В СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Клюева Наталья Витальевна

Официальные оппоненты:

Тамразян Ашот Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет»,
профессор кафедры «Железобетонные и
каменные конструкции»

Прокуров Максим Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Брянская государственная
инженерно-технологическая академия»,
доцент кафедры «Строительные конструкции»

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт
строительной физики российской академии
архитектуры и строительных наук, г. Москва

Защита состоится «13» декабря 2013 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д212.182.05 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан «12» ноября 2013 г..

Ученый секретарь
диссертационного Совета



к.т.н. А.И. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сборно-монолитные железобетонные конструкции и железобетонные конструкции, усиленные при реконструкции, относятся к составным. Такие конструкции либо изготавливаются послойно, либо монтируются из отдельных сборных элементов, образующих основу сооружения, а затем замоноличиваются.

Сборно-монолитные конструкции сочетают в себе отдельные положительные качества как сборного, так и монолитного железобетона, благодаря чему являются весьма эффективными для строительства. Сборные элементы используются здесь не только в качестве несущего слоя, но и в качестве опалубки. Для этого вида конструкций сохраняется возможность вести строительство индустриальными методами, предусматривается весьма простое устройство стыков в узлах сопряжения в виде выпусков арматуры и шпонок, обеспечивается неразрезность сборных элементов путём соответствующего их армирования на промежуточных опорах и тем самым в значительной степени увеличивается жёсткость и пространственная устойчивость всего сооружения в целом.

В последние годы совершенствование составных конструкций связано с проведением реконструкции зданий и сооружений, в процессе которой часто возникает необходимость восстановления и усиления железобетонных стержневых элементов. Это направление в строительстве становится одним из важнейших в области железобетона.

Конструкции, получаемые в результате восстановления и усиления железобетонных стержней и плит, являются, как правило, составными с недеформируемыми или податливыми швами сопряжения элементов.

Анализ конструктивных особенностей составных железобетонных элементов и их швов показывает, что в местах их соединений происходит резкое изменение конструктивных характеристик и свойств материалов, что, безусловно, влечет за собой концентрацию напряженно-деформированного состояния в окрестности швов и приводит к несовместности средних деформаций фибр, прилегающих к шву. Поэтому методы расчета, базирующиеся на гипотезе совместности деформаций старого и нового материалов, требуют пересмотра и соответствующей корректировки.

Таким образом, имеется достаточно представительный класс железобетонных конструкций, конструктивные решения которых выполняются так, что их расчетная схема может быть представлена в виде составного стержня с податливыми связями сдвига. Использование для этих конструкций такой расчетной схемы позволит теоретически обоснованно приблизить к действительности оценку их сопротивления.

Степень разработанности темы исследований. Зональное размещение материалов в железобетонных составных конструкциях позволяет наряду с высокопрочными бетонами использовать бетоны пониженных классов и достичь экономии по расходу стали. Совершенно очевидно, что степень такой экономии и успех решения поставленных в работе задач в значительной мере зависит от предпосылок, положенных в основу решений и степени сложности математического аппарата, который при этом используется. Сегодня в теоретической литературе по избранной теме чаще всего подробно приводятся расчетные зависимости, принципы алгоритмизации задач расчета, в значительно меньшей степени уделяется внимание физическому обоснованию используемых формул. Практически не затрагивались вопросы о физической природе происходящих при этом явлений и в подавляющем большинстве экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций, где, как правило, ставились задачи получения количественных данных об их сопротивлении.

Между тем любому творчески мыслящему профессионалу важно не только формально рассчитать конструкцию, но и понимать, почему используется та или другая зависимость, каков их физический смысл.

Одной из проблемных задач до настоящего времени продолжает оставаться расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям. И хотя в последние годы в решении этой проблемы достигнут заметный прогресс, определилось новое направление, все же

многие важные вопросы остаются неизученными, в частности применительно к исследованию ширины раскрытия наклонных трещин железобетонных составных конструкций. Здесь практически отсутствуют расчетные модели, отражающие все многообразие различных типов наклонных трещин, не разработана математическая модель для определения проекций опасной наклонной трещины по ширине раскрытия трещин, как функции многих переменных и т.п.

Все это не позволяет избежать постоянного трудоемкого экспериментирования и является серьезным препятствием для повышения достоверности расчетов ответственных несущих конструкций.

Отсюда следует, что разработка новой расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях с проведением экспериментально-теоретических исследований по детальному изучению их напряженно-деформированного состояния с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона является актуальной задачей.

Цель работы: разработка расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях на основе анализа и обобщения экспериментов, построение рабочих гипотез, наиболее полно отражающих действительное напряженно-деформированное состояние с учетом его возмущения в швах при наличии усредненных условных сосредоточенных сдвигов, несовместных деформаций бетона и арматуры и нарушения сплошности бетона.

Задачи исследований:

– на основании выполненного обзора исследований, обобщения и анализа собранных результатов экспериментальных и теоретических исследований разработать расчетную модель ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона;

– разработать методику и провести экспериментальные исследования с целью построения расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях и по результатам их анализа провести проверку предлагаемого расчетного аппарата с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона;

– провести численные исследования параметров напряженно-деформированного состояния для оценки ширины раскрытия наклонных трещин и выполнить сравнительную оценку предлагаемого расчетного аппарата с экспериментальными данными и существующими способами расчета.

Научную новизну работы составляют:

1. Расчетная модель ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях, базирующаяся на многоуровневом процессе трещинообразования в виде двух вееров раскрытия трещин, прилегающих к грузу и к опоре, которая трансформируется в многоблочную расчетную схему с выявлением наиболее опасной наклонной трещины, учитывающую условные сосредоточенные сдвиги в шве между бетонами, несовместность деформаций бетона и арматуры и эффект нарушения сплошности бетона.

2. Расчетные схемы второго уровня для определения относительных деформаций бетона и арматуры между наклонными трещинами третьего типа, расположенными над и под опасной кривой трещиной в условиях плоского напряженного состояния.

3. Экспериментальные данные о характере и эффектах деформирования, развития и раскрытия наклонных трещин в железобетонных составных конструкциях на основе исследований плоского напряженно-деформированного состояния бетона, продольной и

поперечной арматуры при различных схемах нагружения, характере армирования, классах бетона.

4. Результаты сопоставительного анализа опытных и расчетных данных ширины раскрытия наклонных трещин железобетонных составных конструкций с использованием предлагаемой расчетной модели и нормативной методики расчета, принятой в качестве основной в практике проектирования.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработанная расчетная модель ширины раскрытия наклонных трещин составных железобетонных конструкций за счет учета параметров и особенностей деформирования арматуры и бетона позволяет получить в одних случаях более достоверные решения, в других – выявить резервы для эффективного использования материалов. Это подтверждается результатами статистической оценки методики расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций на основе обработки опытных данных автора и других исследователей.

Методология и методы исследований. Используется экспериментально-теоретический метод. В теоретических и численных исследованиях, которые выполнены в работе, использованы общие методы механики твердого деформируемого тела, теории составных стержней и теории железобетона.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований по ширине раскрытия наклонных трещин составных железобетонных конструкций при различных схемах армирования и нагружения;

- предложенная расчетная модель наиболее опасной ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях, учитывающая условные сосредоточенные сдвиги в шве между бетонами, несовместность деформаций бетона и арматуры и эффект нарушения сплошности бетон;

- алгоритм расчета и результаты численных исследований ширины раскрытия наклонных трещин с использованием разработанной расчетной методики, а также результаты их сопоставительного анализа с опытными данными и существующими методиками расчета;

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и заключений, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- построением расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин составных железобетонных конструкций на основе закономерностей механики твердого деформируемого тела, теории составных стержней, теории железобетона и реальных условий деформирования;

- сравнительным анализом результатов ширины раскрытия наклонных трещин с использованием разработанной методики расчета с экспериментом и расчетами по нормативной методике, получившей наибольшее распространение в практике проектирования;

- эффективностью предложенных расчетных зависимостей ширины раскрытия наклонных трещин, использованных при проектировании железобетонных составных конструкций зданий и сооружений.

Основные положения диссертации доложены и одобрены на Международной юбилейной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах» (30 октября 2010 г., г. Брянск, БГИТА); Международной научно-методической конференции «Современные проблемы расчета и проектирования железобетонных конструкций многоэтажных зданий», посвященной 100-летию со дня рождения П. Ф. Гвоздева (15 октября 2013 г., г. Москва, МГСУ); на I-ой Международной научно-технической конференции «Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении и строительстве» (14-15 октября 2010г, г. Курск, ЮЗГУ); на

Международном научном семинаре «Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений» (19-20 сентября 2013 г., г. Курск, ЮЗГУ); на расширенном научном семинаре кафедры «Уникальные здания и сооружения» ФГБОУ ВПО Юго-Западного государственного университета (г. Курск, сентябрь 2013 г.).

Внедрение результатов исследования в практику. Результаты проведенных исследований использованы Орловским академическим центром РААСН при проектировании и реконструкции жилых и гражданских зданий, в частности несущих конструкций железобетонных обвязочных ригелей.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ, г. Курск) на кафедре «Промышленное и гражданское строительство»; ФГБОУ ВПО «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс» (ГУУНПК, г. Орел) на кафедре «Строительных конструкций и материалов» при изучении дисциплин: «Железобетонные и каменные конструкции», «Обследование и усиление зданий и сооружений».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 5 научных статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она включает 220 страниц основного машинописного текста, 105 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 197 наименований.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по темам: «Исследования закономерностей неравновесных процессов и статико-динамического деформирования пространственных конструктивных систем и развитие на этой основе теории живучести энерго-, ресурсоэффективных зданий и сооружений» и «Развитие теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений на основе физических моделей сопротивления железобетона при статико-динамическом нагружении» (соглашение № 14.В37.21.0292 и №14.В37.21.1958), а также в рамках плана фундаментальных научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук на 2013 год (тема 7.1.9): «Развитие теории живучести и синтез адаптационно-приспособляемых к аварийным воздействиям конструктивных систем зданий и сооружений».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследования железобетонных составных конструкций, как правило, базируются на предпосылке об абсолютно жёстком шве сопряжения между элементами (работы А. М. Болдышева, А. Е. Жданова, С. И. Меркулова, А. Е. Кузмичева, Ю. Б. Потапова, А. В. Харченко и др.), где объектом опытов были изгибаемые плиты и балки составного сечения, что, как правило, приводит к ощутимому расхождению результатов расчета и эксперимента.

Лишь в последние два десятилетия начали проводиться исследования посвященные изучению напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций с податливыми швами сдвига (работы В. М. Бондаренко, И. В. Волкова, Г.А. Гениева, А.Б. Голышева, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, Э.Н. Кодыш, В.И. Колчунова, Я. Е. Колчина, Р. Л. Маиляна, Г. В. Мурашкина, Л. А. Панченко, Б.С. Расторгуева, В.И. Римшина, А. В.Сконникова, Е. А. Скобелевой, Р.С.Санжаровского, В.П. Селяева, Н.М. Сняtkова, Г.А. Смоляго, В.П. Чиркова, Г.Н. Шоршнева, В. С. Федорова, И.А. Яковенко и др.). В последние годы такие исследования связаны с проведением реконструкции зданий и сооружений, в процессе которой часто возникает необходимость восстановления и усиления железобетонных стержневых элементов. Это направление в строительстве становится одним из важнейших в области железобетона.

Разработкой теоретических основ расчёта и проектирования усиливаемых конструкций занимались многие учёные, такие как Д.О. Астафьев, Х.З. Баширов, В.М. Бондаренко, А.Б. Голышев, А.С. Залесов, С.Н. Карпенко, В.А. Клевцов, Е.А. Король, А. И. Мальганов, Г.В. Мурашкин, Р.С. Санжаровский, Н. М. Сняtkов, В.Ф. Усманов, В.С. Федоров, И.Л. Шубин, И. А. Яковенко и др.

В работе В. М. Бондаренко и В.И. Колчунова обращено внимание на весьма существенные эффекты напряженно-деформированного состояния, происходящие в железобетоне в результате нарушения его сплошности, которые могут быть выражены через дополнительное касательное усилие ΔT . Предложен двухконсольный элемент механики разрушения применительно к железобетону, который позволил найти ΔT , полученное из функционала механики разрушения.

Таким образом, имеется достаточно обширный класс железобетонных конструкций, расчетная схема которых может быть представлена в виде составного стержня с податливыми связями сдвига, что позволит теоретически обоснованно моделировать их работу при учете эффектов, вызванных нарушением их сплошности.

Глава 1 посвящена анализу состояния проблемы и постановке задач исследования. Фундаментом построения расчетной модели, безусловно, явился опытный материал. Экспериментальным исследованиям ширины раскрытия наклонных трещин железобетонных составных конструкций и посвящена **глава 2** диссертационной работы. Их **целью** являлся анализ картин трещинообразования для выявления расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях, основанной на учете условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона, и определения основных опытных параметров, позволяющих выполнить такую проверку.

В процессе **экспериментальных исследований** решались следующие **задачи**:

1) разработка методики экспериментальных исследований ширины раскрытия наклонных трещин железобетонных составных конструкций;

2) экспериментальное определение ширины раскрытия наклонных трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами l_{crc} и длины трещин h_{crc} по мере увеличения нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин), деформаций сжатого бетона и средних деформаций арматуры, высоты сжатой зоны бетона;

3) проверки предлагаемой расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона.

Программа исследований включала лабораторные испытания пяти серий железобетонных конструкций. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в таблице 1.

В эксперименте предусматривались четыре группы электротензорезисторов: по высоте поперечного сечения (в том числе, и на берегах шва); в зонах, прилегающих к шву (рис. 1); розетки над опасной косою трещиной (рис. 2); розетки на составных призмах. Картина трещин, их раскрытие и распространение на каждой ступени нагружения наносилась на специальные планшеты в масштабе 1:1 (рис. 3). Раскрытие трещин на рисунке в виде цифр обозначает: первая цифра – ступень нагружения; в скобках, – величина нагрузки в кН; цифра после тире – ширина раскрытия трещин в мм.

При измерении прогибов составных призм на удалении 1, 1,5 и 2 см от шва устанавливались прогибомеры (с ценой деления 0,01 мм). Весьма информативными были картины трещин, а также графики средних деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры. Здесь имеют место две наклонные трещины, образующие веер I (трещины, начинающиеся у нижней грани составного элемента), и одна наклонная трещина, относящаяся к вееру II (трещины, начинающиеся в зоне нейтральной оси элемента). Экспериментально установлено, что ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной арматуры существенно меньше, чем на некотором (2 – 3 диаметра) удалении от этой оси. Анализ показывает, что арматура сдерживает раскрытие трещины, противодействуя раскрытию ее берегов.

Таблица 1.

Объем, серии и характеристики основных экспериментальных конструкций*

№ серии	Шифр конструкции	h , мм	b , мм	l , мм	Арматура растянутой зоны, диаметр – мм, класс	Арматура сжатой зоны, диаметр – мм, класс	Высота слоя старого бетона, мм	Высота слоя бетона усиления, мм	Класс бетона основного образца	Класс бетона усиления
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	БО-I-1,5-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
I	БО-I-1,5-150-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-I-1,5-150-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БО-I-1,5-150-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-I-1,5-100-Ø6- l_k	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
II	БО-II-2,7-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-II-2,7-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
III	БО-III-2,7-100-Ø10(n1)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-III-2,7-100-Ø10(n1)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	–	B20	–
	БО-III-2,7-100-Ø10(n2)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-III-2,7-100-Ø10(n3)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
IV	БО-IV-1,0-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БО-IV-1,0-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-IV-1,0-150-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БО-IV-1,0-150-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
V	БО-V-2-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БО-V-2-100-Ø6	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30

* **Примечание.** Шифр конструкции включает номер серии, **БО** или **БС** – балка обычного или составного сечения соответственно; 1,5; 2,7; 1,0; 2,0 – пролеты среза; 100; 150; 320 – шаг поперечной арматуры; Ø6, Ø10 – диаметры поперечных стержней в шве, в зоне чистого изгиба, l_k – конструкции с недостаточной анкеровкой; арматура Ø6A240C раскатывается из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло выгибания на площадке текучести); после разрушения одного из пролетов среза на него устанавливается стяжка и до разрушения доводится второй пролет среза

$n1$ – шов в зоне чистого изгиба длиной 320 мм не имеет поперечной арматуры; $n2$ – шов в зоне чистого изгиба длиной 320 мм, имеет поперечную арматуру, установленную с шагом 100 мм диаметром 6 мм класса A240C; $n3$ – шов в зоне чистого изгиба длиной 320 мм, имеет поперечную арматуру, установленную с шагом 100 мм диаметром 10 мм класса A400C

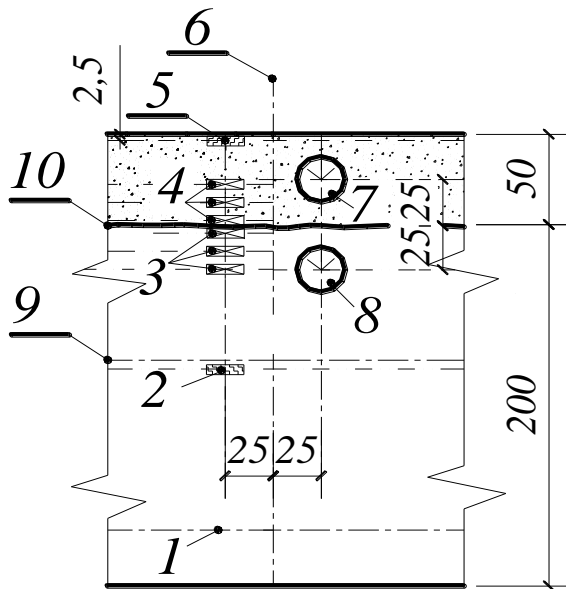


Рисунок 1 – Схема расположения первой и второй групп электротензорезисторов
 1 – ось (оси) растянутой арматуры; 2 – электротензорезистор, расположенный снизу от нейтральной оси 9; 3 – электротензорезисторы, прилегающие к шву, расположенные в зоне бетона первого слоя; 4 – то же, в зоне бетона второго слоя; 5 – электротензорезистор, расположенный вдоль фибровых волокон бетона второго слоя; 6 – сечение 1-1; 7 – мембранные розетки электротензорезисторов, расположенные в зоне бетона второго слоя, прилегающей к шву; 8 – то же, в зоне бетона первого слоя; 9 – средняя нейтральная ось образца; 10 – шов между бетонами



Рисунок 2 – Общий вид испытаний железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям

Возникающие при этом реакции вызывают местное сжатие в бетоне в окрестности трещины в околоарматурной зоне – эффект нарушения сплошности. Движение трещины, относящееся к вееру II идет по двум направлениям: в сторону сжатой грани бетона и в сторону продольной растянутой арматуры.

Результаты обработки электротензорезисторов, установленных на основные образцы и составные призмы позволили получить следующие опытные значения коэффициента жесткости шва ξ : для швов между бетонами В20/В30, $\xi = 1982,2 \text{ кН/см}^2$; для швов между бетонами В30/В30, $\xi = 2528,5 \text{ кН/см}^2$.

Построению расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин посвящена *глава 3* диссертационных исследований.

Кроме уже известных типов наклонных трещин (первого типа – с максимальным раскрытием в нижней зоне конструкции, где $M \geq M_{crc}$, а $Q < Q_{crc}$ и $Q \geq Q_{crc}$; второго типа – с максимальным раскрытием на уровне нейтральной оси, где $M < M_{crc}$ и $Q > Q_{crc}$) в настоящей работе выявлены трещины третьего типа, образующиеся в приопорной арке, которые могут выходить на верхнюю грань железобетонной конструкции практически в любую точку (необязательно совпадающую с точкой приложения силы) при пролетах «среза» больше двух.

На основании углубленного исследования природы и характера трещинообразования на участках совместного действия изгибающего момента и поперечной силы выявленных трещин, третьего типа и вееров трещин, формирующихся возле опоры и груза, стало возможным дальнейшее развитие расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях, основанной на оценке действительного напряженного и деформированного состояния бетона и арматуры на этих участках.

В основу построения расчетной модели по ширине раскрытия наклонных трещин составных железобетонных конструкций положены следующие основные предпосылки:

- расчет базируется на многоблочной расчетной модели, включающей два веера возможных наклонных трещин трех типов, приведенных в работах Баширова Х. З. и автора и дополненные на рис. 4 – 7;

- напряжения в бетоне и арматуре определяются с использованием билинейных диаграмм связей $\sigma-\varepsilon$; в пределах каждого из составляющих стержней считается справедливой гипотеза плоских сечений для средних деформаций бетона и арматуры;

- образование трещин происходит после достижения растянутыми волокнами бетона вдоль оси поперечной (продольной) арматуры предельных деформаций; уровней трещинообразования может быть несколько;

- раскрытие трещин – это накопление относительных условных сосредоточенных взаимных смещений арматуры и бетона на участках, расположенных по обе стороны от трещины (гипотеза Томаса);

- связь между напряжениями сцепления τ и относительными условными сосредоточенными взаимными смещениями поперечной (продольной) арматуры и бетона $\varepsilon_g(x)$ принимается линейной с секущим модулем сдвига; параметр жесткости шва ξ_m определяется из эксперимента на сдвиг призм из разных бетонов, в том числе, с арматурными стержнями в шве;

- учитывается дополнительное деформационное воздействие в трещине, связанное с нарушением сплошности материала, выраженное через сдвигающие усилия ΔT и деформации укорочения бетона $\varepsilon_{bt,c}$ в местной зоне, прилегающей к трещине (гипотеза Бондаренко-Колчунова).

В расчете используются параметры напряженно-деформированного состояния поперечного сечения I–I, проходящего под грузом. Неизвестные параметры (x ; σ_{b2} ; σ_{b1} ; σ_s ; σ'_s) определяются из следующих уравнений: высота сжатой зоны бетона x – из уравнений равновесия суммы проекций всех сил на ось X ($\sum X = 0$); из гипотезы плоских сечений, принятой для средних деформаций в пределах каждого из составляющих стержней – напряжения в первом бетоне $\sigma_{b,1}$, растянутой арматуре σ_s и сжатой арматуре σ'_s ; напряжение в бетоне сжатой зоны $\sigma_{b,2}$ – из уравнения равновесия моментов всех сил, действующих в поперечном сечении относительно точки O ($\sum M_o = 0$). При этом эпюра напряжений сжатого бетона принята прямоугольной.

К расчету привлекается для описания напряженно-деформированного состояния участков $A_2B_2B_1A_1$ и $I_3A_3A_2I_2$ формула клина (рис. 4, 5) для точек, расположенных на его оси. Затем определяются усилия M , N и Q , используя усредненные прямоугольные эпюры их распределения по сечению с использованием коэффициентов наполнения $\omega = 0,8$. Опираясь на полученные внутренние усилия, уточняется распределение нормальных и касательных напряжений по поперечным сечениям блоков IV и V, используя формулы для внецентренного сжатия (растяжения) и формулу Журавского для стержневых элементов.

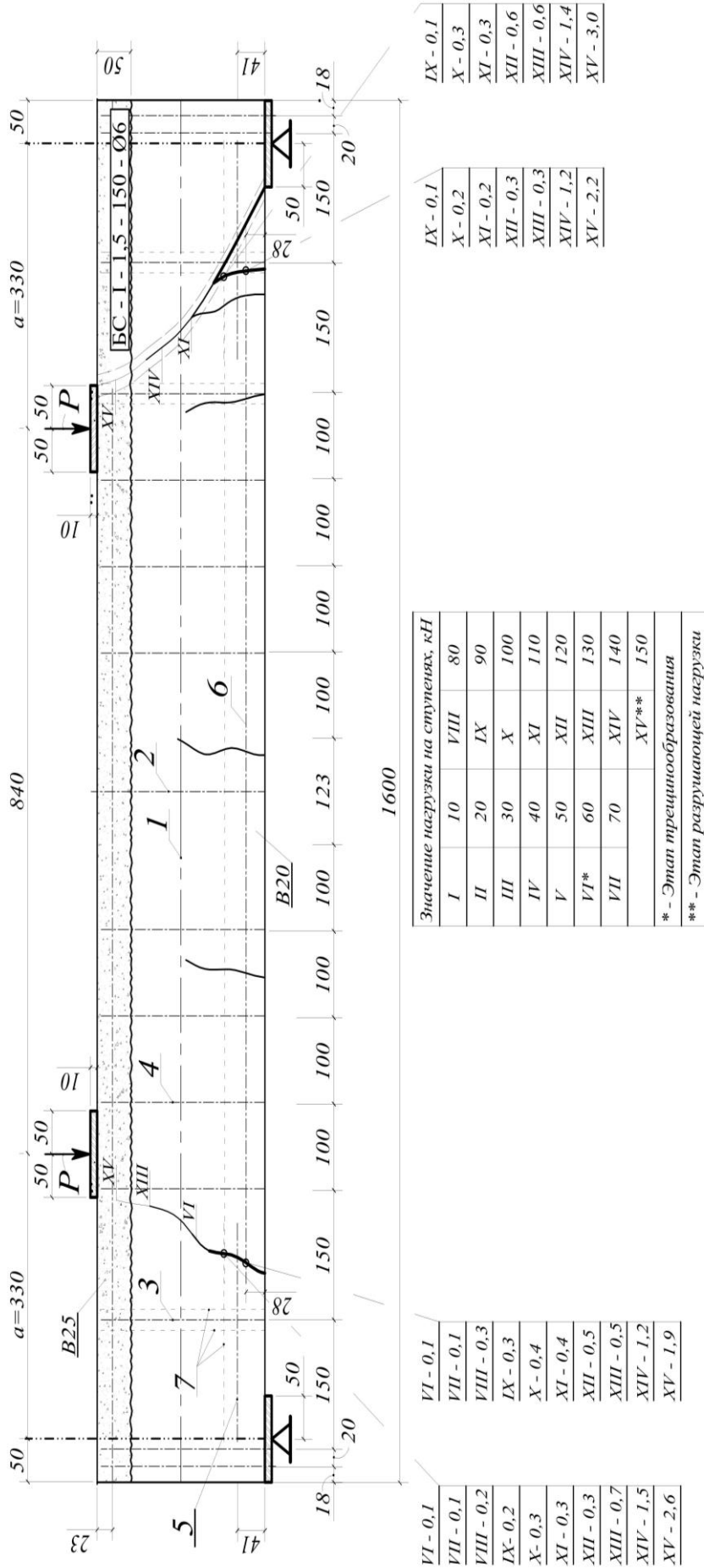


Рисунок 3 – Схема образования и раскрытия трещин в опытной конструкции первой серии BC – I – 1,5 – 150 – Ø6:

- 1 – средняя нейтральная ось; 2 – вертикальная ось симметрии образца; 3 – поперечные хомуты диаметром 6 мм из стали A240C; 4 – поперечные хомуты диаметром 10 мм из стали A240C; 5 – геометрические оси нижней рабочей арматуры в приопорной зоне 2Ø10A400C; 6 – геометрические оси нижней рабочей арматуры в середине балки 2Ø16A400C; 7 – дополнительные оси для замера трещин, смещенные от осей арматуры на расстоянии двух диаметров

Тогда в соответствии с рис. 4 и 5 касательные напряжения τ_{xy} в i -м стержне, входящим в железобетонный составной стержень, определяются по формуле:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{B(z_i)} \left[\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{A_i} \cdot A(z_i) - \frac{Q^0 E_i J_i}{\sum EJ} - \frac{S(z_i)}{J_i} + \sum_{j=1}^n \tau_j c_j \cdot \frac{E_j J_j}{\sum EJ} \frac{S(z_i)}{J_i} + \tau_{i-1} \right], \quad (1)$$

в которой, при наличии трещин

$$\tau_i = T' = \xi_m^2 \gamma e^{\gamma \xi_m z} \int \frac{\Delta(z)}{e^{\gamma \xi_m z}} dz + \xi_m e^{\gamma \xi_m z} \frac{\Delta(z)}{e^{\gamma \xi_m z}} + C_\tau, \quad (2)$$

$$\Delta(z) = -\frac{N_{0,1}}{(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}} + \frac{N_{0,2}}{(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}} - \frac{f(x_{кр})}{\rho}, \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma} = \sqrt{\xi \left[\frac{1}{(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}} + \frac{1}{(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}} + \frac{f^2(x_{кр})}{M \cdot \rho} \right]}. \quad (4)$$

Здесь, $N_{0,1}$, $N_{0,2}$ – продольные силы от внешней нагрузки в первом и втором железобетонном стержне соответственно; $(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}$, $(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}$ – эквивалентные жесткости поперечных сечений отдельных железобетонных стержней; ρ – радиус кривизны для железобетонного составного стержня; $\sum EI = M \cdot \rho$, $E_i I_i = M_i \cdot \rho$; M – полный момент в составном стержне; ξ – жесткость шва, определяется на основании экспериментальных исследований составных призм, в том числе армированных; $(E_{b,i} A_{b,i})_{ekv} =$

$\frac{N_i}{\varepsilon_0}$; $\varepsilon_0 = B_{12} M_i + B_{22} N_i$, B_{12} и B_{22} выражены в виде функций от следующих параметров:

$z_s; z_b; b; h_0; \xi; A_s; E_s; E_b; \tilde{\nu}; \psi_s; \psi_b; \varphi_f$; M_{act} – момент всех сил, расположенных по одну сторону рассматриваемого сечения, составляющего стержня относительно выбранной оси y , включая сдвигающие силы в шве; N_1 — внешняя продольная сила, приложенная на уровне оси y и принимаемая при растяжении со знаком «плюс», включая сдвигающие силы в шве; z_s, z_b – расстояния от выбранной оси y до точки приложения равнодействующей усилий соответственно в растянутой арматуре и в сжатом бетоне; параметры $\xi; \tilde{\nu}, \varphi_f, \psi_s, \psi_b$ – определяется согласно указаниям норм.

Располагая значениями касательных напряжений, определяются деформации относительного сосредоточенного сдвига ε_{qm} в шве, необходимых для определения параметров напряженно-деформированного состояния i -х сечений в «пролете среза».

Анализ картины наклонных трещин в «пролете среза» в верхней и нижней зоне железобетонной конструкции (рис. 4, 5) позволяет выявить расчетную схему второго уровня для определения деформаций растянутого бетона вдоль оси поперечной арматуры – $\varepsilon_{bt}(y)$, (рис. 6, 7). Наклонные площадки, расположенные под углом $\alpha_{кр}$ практически перпендикулярны главным деформациям удлинения бетона по направлению которых и возникают наклонные трещины.

Тогда, используя формулу плоского напряженного состояния для вырезанных поперечными сечениями железобетонных элементов на участке длиной S между поперечными стержнями и составляя уравнения равновесия проекций всех сил на ось Oy ($\sum Y = 0$), получим зависимость, из которой отыскивается деформации растянутого бетона вдоль оси поперечной арматуры:

$$\sigma_{sw} A_{sw} - \sigma_{sw}(y) A_{sw} - \frac{E_b \cdot \nu_b}{(1 - \mu_b^2)} \cdot \frac{S \cdot b}{\cos \alpha_{кр}} \cdot \varepsilon_{bt}(y) +$$

$$+ \frac{\mu_b}{(1-\mu_b^2)} \cdot E_b \cdot v_b \cdot S \cdot b \cdot (D_{10} \cdot \varepsilon_{bt}(y) - D_{11} \cdot y + D_{12}) + D_1 \cdot y + D_2 = 0, \quad (5)$$

где

$$\frac{Q_{j+1,up}}{h_{j+1,up}} - \frac{Q_{j,up}}{h_{j,up}} = D_1, \quad (6)$$

$$\left(\frac{Q_{j+1,up}}{h_{j+1,up}} - \frac{Q_{j,up}}{h_{j,up}} \right) \cdot t_* + \left(\frac{Q_{j+1,up}}{h_{j+1,up}} + \frac{Q_{j,up}}{h_{j,up}} \right) \cdot 0,5Stg\alpha_{crс} = D_2. \quad (7)$$

Параметры $D_{10} \dots D_{12}$ выражены в виде функций от: $S; b; E_b; v_b; \mu_b; \alpha_{crс}; h_{j,up}; h_{j+1,up}; Q_{j,up}; Q_{j+1,up}; M_{j,up}; M_{j+1,up}; I_{m,up}$.

Для расчета ширины раскрытия наклонных трещин необходимо располагать напряжениями в продольной и поперечной арматуре в местах их пересечения опасными (с точки зрения максимальной ширины раскрытия) наклонными трещинами соответствующего типа. Такие напряжения определяются из уравнений равновесия соответствующих блоков расчетной схемы (рис. 4, 5).

Применительно к трещинам третьего типа определяется высота сжатого бетона $x_{B,2}$ над наклонной трещиной в сечении II–II ($\sum 0X = 0$); погонные усилия в хомутах q_{sw} , пересекаемых наклонной трещиной ($\sum 0Y = 0$); напряжения в продольной арматуре $\sigma_{s,3}$, в сечении 3–3 ($\sum M_L = 0$).

Применительно к трещинам первого и второго типа определяются погонные усилия в хомутах q_{sw} , пересекаемых наклонной трещиной ($\sum 0Y = 0$); высота сжатого бетона $x_{B,2}$ над наклонной трещиной в сечении 1–1 ($\sum 0X = 0$); напряжения в растянутой арматуре σ_s ($\sum M_B = 0$); высота сжатого бетона x в сечении 1–1 ($\sum 0X = 0$); напряжения в сжатом бетоне σ_b над опасной наклонной трещиной ($\sum M_O = 0$); напряжения в растянутой арматуре $\sigma_{s,m,1}$ и в сжатом бетоне $\sigma_{b,1}$ под наклонной трещиной.

Записав функцию $F(q_{sw}, x_{B,2}, \sigma_{s,3}, c_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ и отыскивая ее частные производные по соответствующим переменным, после алгебраических преобразований, было получено уравнение для определения проекции опасной наклонной трещины третьего типа по ширине раскрытия:

$$H_1 c_2^2 + H_2 c_2 + H_3 = 0. \quad (8)$$

Здесь, параметры H_1, H_2, H_3 зависят от геометрических характеристик железобетонных составных конструкций, геометрических и механических характеристик бетона и арматуры, параметров сцепления, параметров напряженно-деформированного состояния расчетной схемы: $S, B_{a,1}, B_{a,2}, A_{sw}, E_{sw}, q_{sw}, q_{sw,hor}, Q_{s,3}, h_0, x_{B,2}, \omega_{\sigma,2}, \omega_{\tau,2}, \omega_{\tau,3}, \sigma_{x,2}, \sigma_{s,3}, \tau_{xy,2}, b, b_3, R_{sup}, b, b_3, A_{S,i}, l_{an}, l_x, \alpha_s, v_b$ (см. рис. 4, 5).

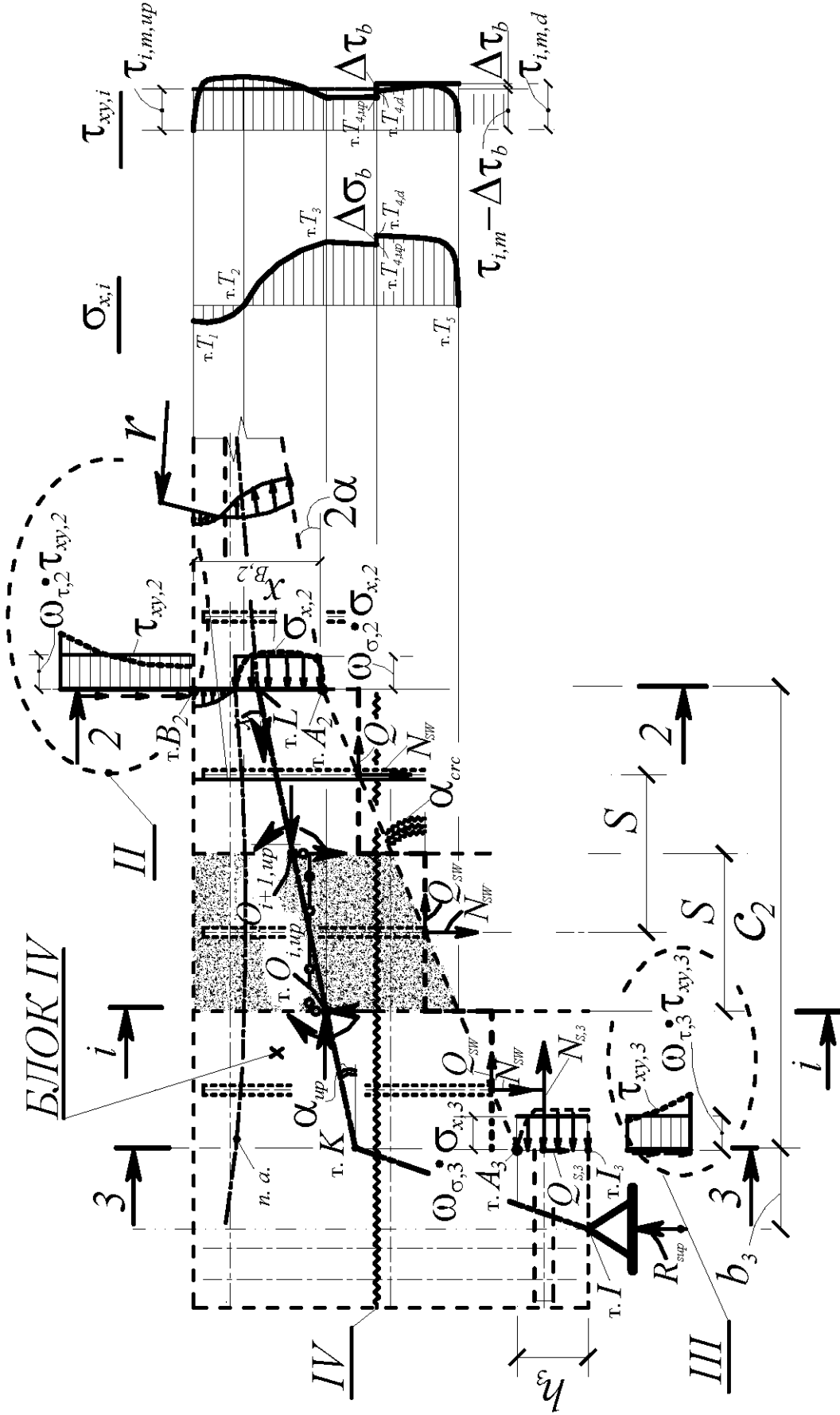


Рисунок 4 – Расчетная схема к определению напряженно-деформированного состояния в i -ом поперечном сечении IV блока железобетонной составной конструкции

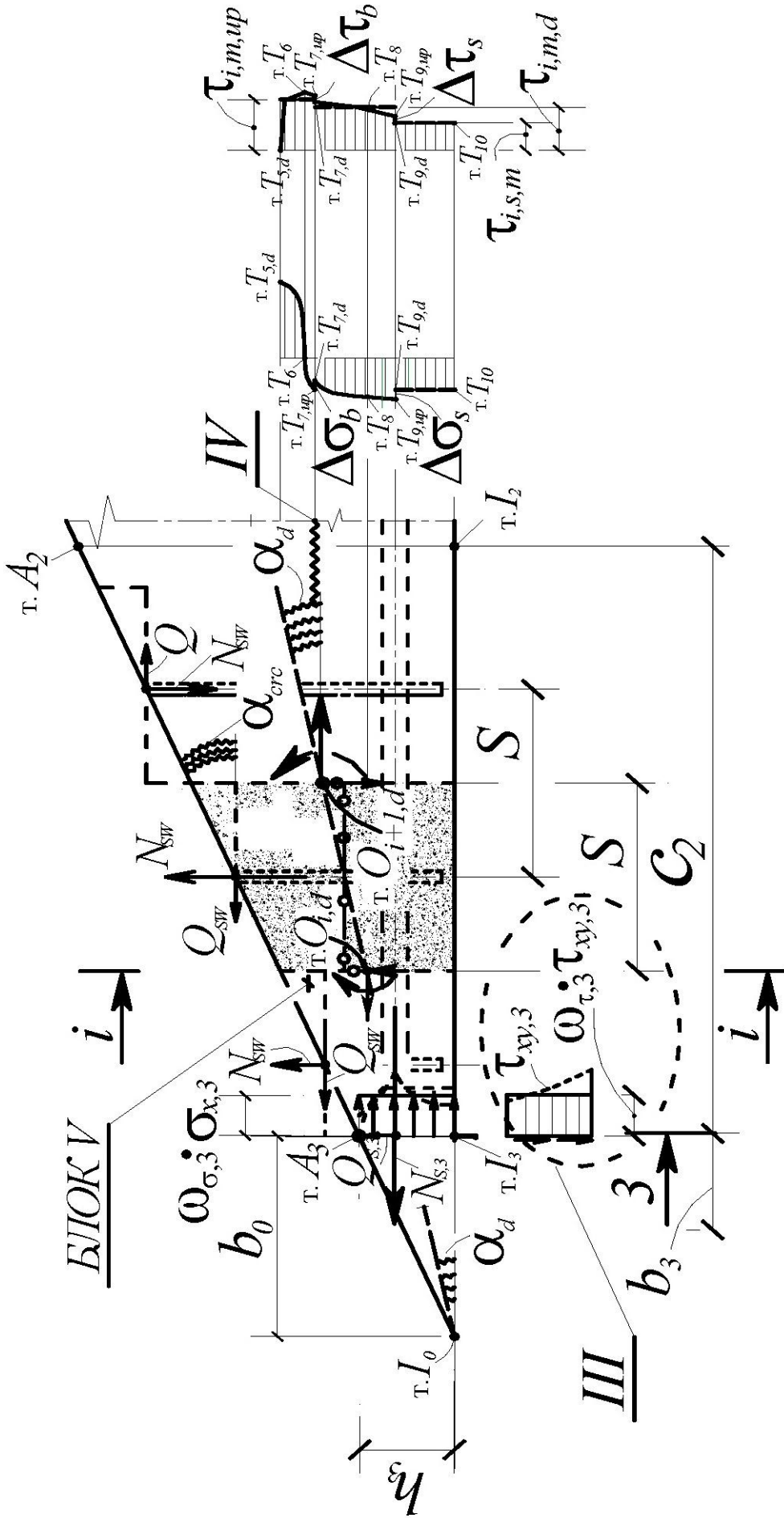


Рисунок 5 – Расчетная схема к определению напряженно-деформированного состояния в i -ом поперечном сечении V блока железобетонной составной конструкции

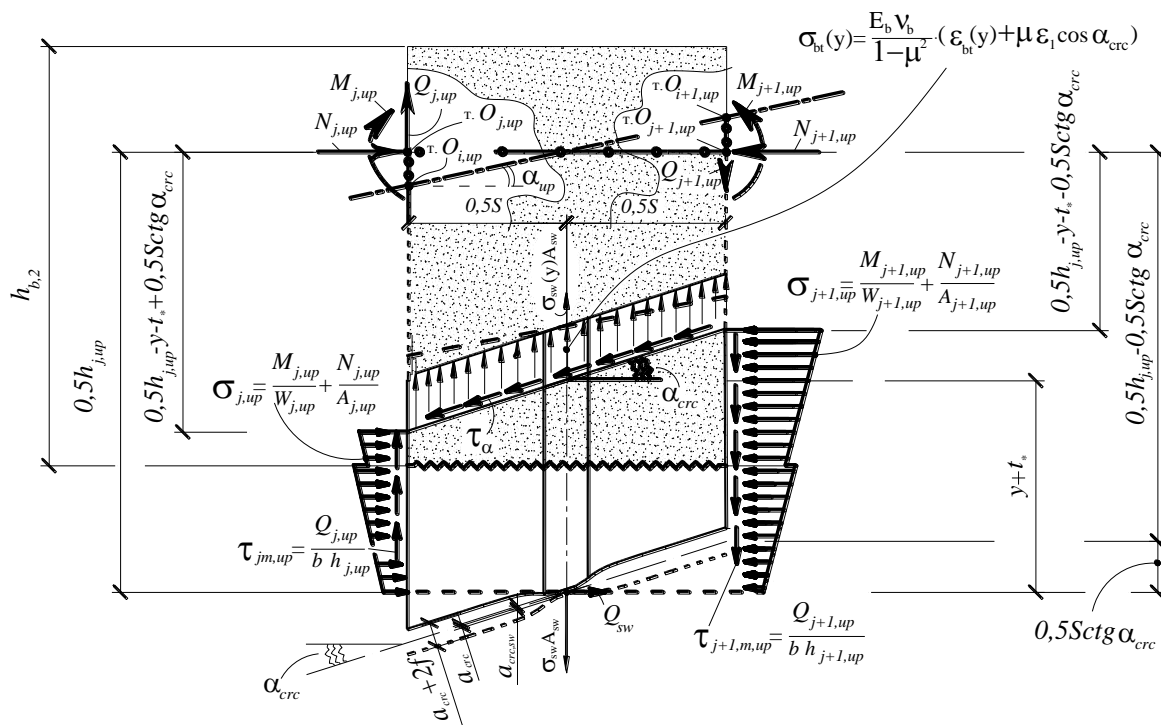


Рисунок 6 – Расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ между наклонными трещинами третьего типа в железобетонной составной конструкции (случай 1)

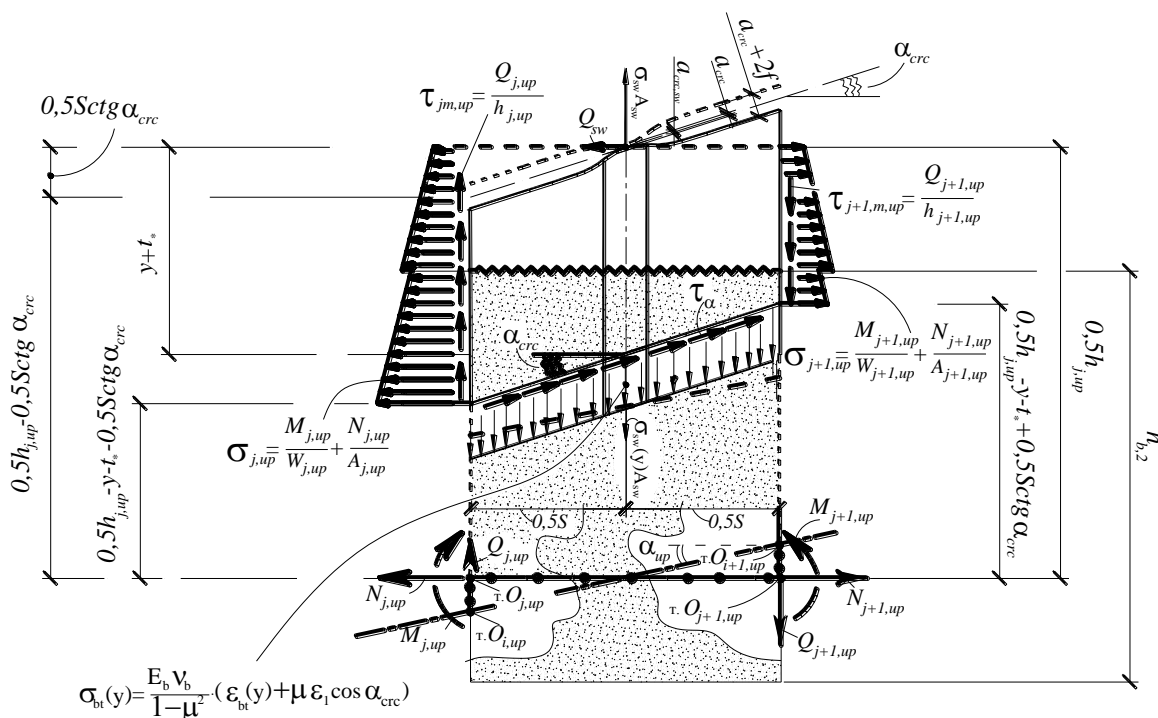


Рисунок 7 – Расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ между наклонными трещинами первого, второго и третьего типов в железобетонной составной конструкции (случай 2)

Аналогичное уравнение для определения проекции опасной наклонной трещины первого и второго типов по ширине раскрытия примет вид:

$$(k_1 k_2 k_{21} + k_1 k_{21} + k_1 k_{23}) C_2^2 + C_2 + k_1 k_{22} - k_1 k_2 k_{21} = 0. \quad (9)$$

Здесь параметры $k_1, k_2, k_{21} - k_{23}$ зависят от геометрических характеристик железобетонных составных конструкций, геометрических и механических характеристик

бетона и арматуры, параметров сцепления, параметров напряженно-деформированного состояния расчетной схемы: $S, B, B_{a,1}, B_{a,2}, A_{sw}, E_{sw}, q_{sw}, q_{sw,hor}, Q_{s,3}, h_0, \tau_b, x, x_{B,2}, \sigma_b, \sigma_s, \sigma_{s,1}, \tau_{xy,2}, a, b, R_{sup}, A_{s,i}, \alpha, \psi_s, v_b$ (см. рис. 4).

После отыскания наиболее опасных наклонных трещин и определения напряжений в поперечной арматуре, можно переходить к расчету ширины раскрытия наклонных трещин.

В соответствии с принятыми предпосылками относительные взаимные смещения деформаций бетона и арматуры $\varepsilon_g(y)$ на участке между наклонными трещинами в железобетонных составных конструкциях, равны:

$$\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw}(y) - \varepsilon_{bt}(y). \quad (10)$$

После подстановки относительных деформаций поперечной арматуры $\varepsilon_{sw}(y)$ и относительных деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ в уравнение (8), получено следующее уравнение:

$$\frac{d\varepsilon_g(y)}{dy} + B\varepsilon_g(y) = \frac{D_{14}}{D_{13}}. \quad (11),$$

где D_{13} – функция от $S; b; E_b; v_b; \mu_b; \alpha_{cr}$;

D_{14} – функция от параметров $S; b; E_b; v_b; \mu_b; \alpha_{cr}; h_{j,up}; h_{j+1,up}; Q_{j,up}; Q_{j+1,up}; M_{j,up}; M_{j+1,up}; I_{m,up}$.

Решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (11) имеет вид:

$$\varepsilon_g(y) = C \cdot e^{-By} + \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (12)$$

Постоянная интегрирования C находится из граничного условия, в соответствии с которым при $y = 0$, $\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b}$:

$$C = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b} - \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (13)$$

Здесь $\sigma_{bt,c}/v_b E_b$ соответствует деформациям бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ в сечении, расположенном на расстоянии t_* от сечения с трещиной (рис. 6, 7); ΔT – результирующая условных касательных напряжений в местной зоне, прилегающей к трещине, которая отыскивается в соответствии с предложениями В.М. Бондаренко и В. И. Колчунова.

В соответствии с принятыми предпосылками, раскрытие трещин рассматривается как накопление относительных условных сосредоточенных взаимных смещений арматуры и бетона на участках, расположенных по обе стороны от трещины. Тогда,

$$\lambda_1 = C_2(\lambda_2 k_3 - \lambda_3 - \lambda_3 C_2). \quad (14)$$

После подстановки (12) и (13) в зависимость (14), интегрирования и алгебраических преобразований, получена формула для определения ширины раскрытия наклонных трещин

$$a_{cr} = -\frac{2\Delta T}{G} + \frac{2}{B} \left(\frac{q_{sw} S}{A_{sw} E_{sw}} + B_{a,1} \right) (1 - e^{-\ln B_4}) - \frac{2B_2}{B} \ln \left(1 + \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw} E_{sw}}{q_{sw} S + B_{a,1} A_{sw} E_{sw}} \right). \quad (15)$$

В результате предложена расчетная модель ширины раскрытия наклонных трещин железобетонных составных конструкций с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона, позволяющая сохранить физический смысл вычисляемых параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций.

Четвертая глава диссертации посвящена численным исследованиям.

Разработан алгоритм расчета ширины раскрытия наклонных трещин составных железобетонных конструкций с учетом ряда важных факторов, таких как деформации арматуры в сечении с трещиной ε_s , параметры сцепления B , $B_{a,1}$, $B_{a,2}$, G арматуры с бетоном, геометрические характеристики сечения и характеристики бетона и арматуры – S , A_{sw} , E_{sw} ; погонные усилия в хомутах q_{sw} ; деформационный эффект, возникающий в железобетонном элементе после нарушения сплошности, выраженный через результирующую условных касательных напряжений ΔT в местной зоне, прилегающей к трещине (в формуле для определения ширины раскрытия трещин появляется слагаемое с обратным знаком), относительные условные сосредоточенные взаимные смещения бетона и арматуры. Кроме того, для расчета ширины раскрытия трещин весьма важным является определение расстояния между трещинами l_{cr} , которое отыскивается на основании первой дополнительной предпосылки. С возрастанием деформаций раскрытие трещин увеличивается, хотя одновременно наблюдается и обратная тенденция, связанная с уменьшением расстояния между трещинами.

Следует подчеркнуть, что для всех серий графики экспериментальных и теоретических зависимостей $a_{cr} - N/N_u$ возрастают с увеличением уровня нагружения, несмотря на то, что с увеличением напряжений в арматуре происходит одновременное уменьшение уровня расстояния между трещинами (рис. 8, 9).

Введение в формулу норм постоянного эмпирического значения расстояния между трещинами, диаметра арматуры вместо периметра, неучет деформаций бетона на участках между трещинами, а также эффекта нарушения сплошности – все эти факторы вместе не позволяют оценивать действительное изменение ширины раскрытия трещин на различных стадиях нагружения конструкций (рис. 8, 9). При этом, теоретические результаты ширины раскрытия наклонных трещин по предлагаемой методике приближаются к опытным (максимальное отклонение не превышает 20%), по методике Х. З. Баширова составляют 27%, по нормативной методике – свыше 50%.

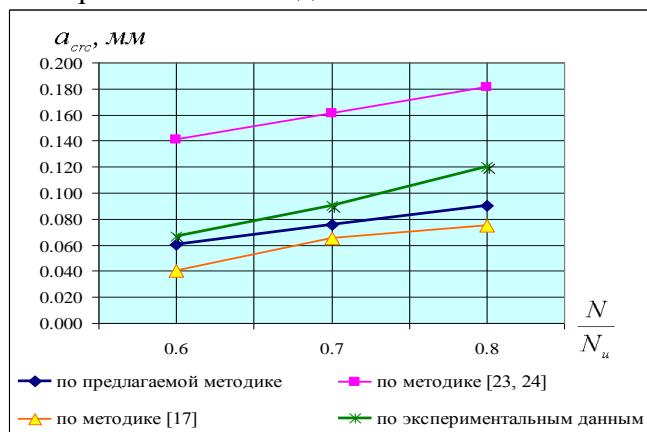


Рисунок 8 – Графики зависимости « $a_{cr} - N/N_u$ » для конструкций второй серии БО-П-2,7-100-Ø6

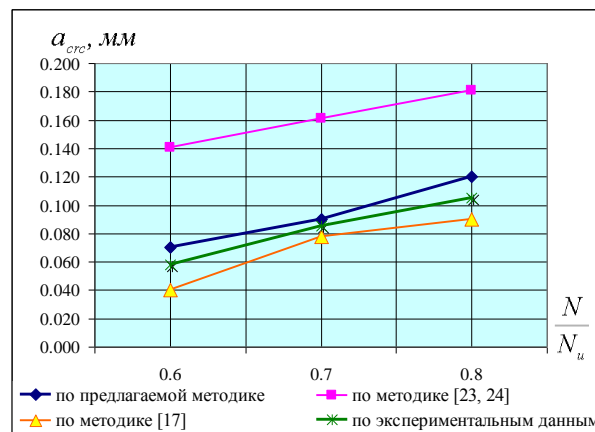


Рисунок 9 – Графики зависимости « $a_{cr} - N/N_u$ » для конструкций второй серии БС-П-2,7-100-Ø6

Проведенный анализ графиков (рис. 11) средних деформаций арматуры и бетона в (см. рис. 5, сечение 1–1) позволяет с уверенностью утверждать о целесообразности использования гипотезы плоских сечений (максимальное отклонение не превышает 19%). При этом в швах между бетоном и арматурой наблюдаются резкие возмущения деформаций, которые можно рассматривать как сосредоточенные сдвиги, характерные для составных стержней.

Критерием объективности любого аналитического аппарата для описания напряженно-деформированного состояния элемент

а служит его соответствие опытным данным. Поэтому для оценки эффективности разработанной методики расчета, был выполнен такой анализ с использованием накопленного банка опытных данных в широком диапазоне изменения класса бетонов (В10 – В60), при различных схемах загрузки, армирования, формы и размеров поперечного сечения (монолитного и составного), величины предварительного натяжения, эксцентриситета продольной силы и изменения расстояния от оси арматуры до растянутой грани элемента, что дает полное представление о соответствии положенных в ее основу предпосылок и формул.

На основании накопленного банка опытных данных выполнено сопоставление предлагаемой расчетной методики с нормативной и с опытными данными. Следует отметить, что расчет по предлагаемой методике не только качественно (с реализацией многоуровневой схемы трещинообразования) подтверждает полученную из опытов ширину раскрытия трещин, но и количественно: среднее квадратическое отклонение не превышает 13,3%.

По нормативной методике среднее квадратическое отклонение составляет около 21,4%, что указывает на явные преимущества предлагаемой методики (табл. 2).

Результаты сопоставления опытной и теоретической ширины раскрытия трещин приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сопоставления опытной и теоретической ширины раскрытия трещин

Расчётная методика	Количество опытов	Результаты статистической обработки данных		
		\bar{X}	σ	C_v
Предлагаемая методика	276	1,027	0,133	13,02%
Методика норм	276	0,778	0,214	27,57

Из анализа статистических данных следует, что предлагаемая расчетная методика дает наиболее приемлемые результаты в оценке ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций, о чём свидетельствует коэффициент вариации $C_v = 13,02\%$ и значение среднего \bar{X} , близкого к единице.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результатом диссертации является решение важной научно-технической задачи построения расчетной модели ширины раскрытия трещин составных железобетонных конструкций на основе проведенных экспериментально-теоретических исследований.

Основные выводы и результаты работы сводятся к следующему:

1. Из выполненного обзора исследований следует, что имеется достаточно представительный класс железобетонных конструкций, конструктивные решения которых выполняются так, что их расчетная схема может быть представлена в виде составного стержня с податливыми связями сдвига. Установлено, что дальнейшее развитие теории сопротивления железобетонных конструкций и поиск соответствующих расчетных моделей по наклонным сечениям происходит в направлении углубленного исследования природы и характера трещинообразования и разработки аналитического аппарата, основанного на оценке действительного напряженно-деформированного состояния.

2. На основании обобщения и анализа собранных результатов экспериментальных и теоретических исследований разработана расчетная модель ширины раскрытия наклонных трещин трех типов с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона, включающая следующие основные положения:

– выявленный физический смысл уравнений, определяющих проекцию наиболее опасной кривой трещины любого типа по ширине раскрытия из соответствующих вееров, заключающийся в том, что эти уравнения позволяют среди множества возможных наклонных трещин, отыскивать трещину с наибольшей шириной ее раскрытия;

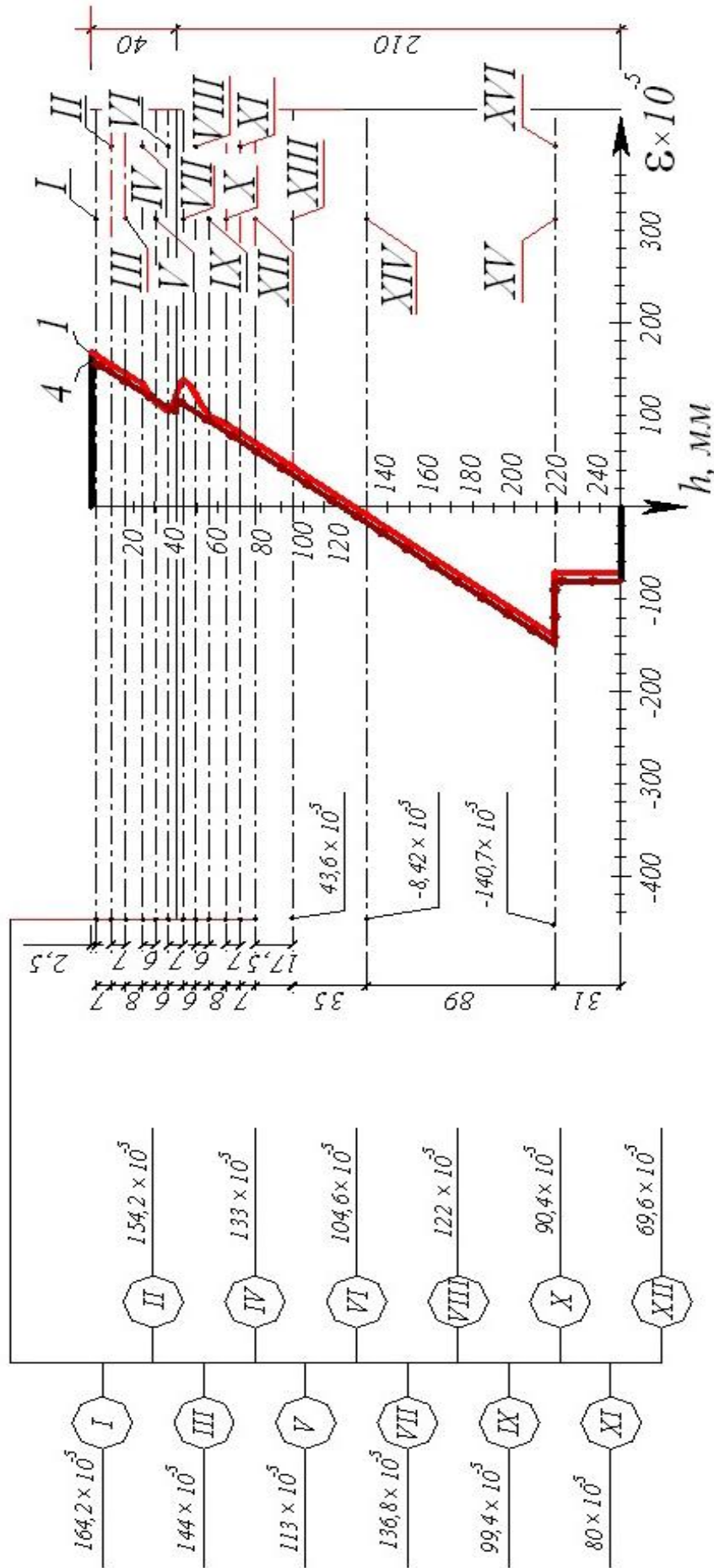


Рисунок 10 – Графики деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в поперечном сечении опытного образца БС-I-1,5-150-Ø6 расположенного в середине пролета на ступени нагружения в 174,3 кН ($0,6N_u$); I–XV – оси баз электротензорезисторов, расположенных на бетоне, XVI – то же, на арматуре; 1 – экспериментальный график; 4 – то же, по предлагаемой методике; в квадратных скобках приведены относительные опытные деформации бетона на ступени нагружения 174,3 кН

- экспериментально выявленный многоуровневый процесс трещинообразования в виде двух вееров раскрытия трещин, прилегающих к грузу и к опоре;
- построенную многоблочную расчетную схему, в которой применительно к опасным наклонным трещинам третьего типа используются четвертый и пятый блоки (где для определения напряженно-деформированного состояния специально выделенных поперечных сечений 1–1, 2–2 и 3–3 привлекаются схема составного стержня и клина), а применительно к опасным трещинам первого и второго типов используются первый–третий блоки (при этом надобность в определении напряженно-деформированного состояния поперечных сечений 3–3 и 2–2 отпадает, используется лишь сечение 1–1);
- предложенные расчетные схемы второго уровня для определения относительных деформаций бетона и арматуры между наклонными трещинами третьего типа, расположенными над и под опасной косою трещиной, соответственно, в условиях плоского напряженного состояния.

3. Получены опытные данные о характере и эффектах деформирования, образования, развития и раскрытия нормальных и наклонных трещин на уровне оси продольной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещины; многоуровневого изменения расстояния между трещинами l_{crc} и длины трещин h_{crc} по мере увеличения нагрузки в железобетонных составных конструкциях плоского напряженно– деформированного состояния бетона, продольной и поперечной арматуры при различных схемах загрузки, характере армирования, классах бетона, которые позволили:

- проверить работу расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона и соответствие ее расчетных гипотез и параметров действительному деформированному состоянию;
- доисследовать неясные вопросы сопротивления отдельных зон железобетонных элементов, в том числе многоуровневую схему трещинообразования, характер развития и раскрытия трещин, величины проекций наклонных опасных трещин, эффект нарушения сплошности бетона, которые в существенной степени дополняют имеющийся фактический материал.

При этом подтверждено, что арматура сдерживает раскрытие трещины, противодействуя раскрытию ее берегов, и возникающие при этом реакции вызывают местное сжатие в бетоне в окрестности трещины – эффект нарушения сплошности, что и приводит к изменению профиля трещины от треугольного к сложному (трещины имеют максимальное раскрытие не на уровне оси арматуры, а в некоторой зоне, отстоящей от оси арматуры на два диаметра).

Трещины, образующиеся в приопорной зоне в середине столба образующейся арки могут выходить на верхнюю грань железобетонной конструкции практически в любую точку (необязательно совпадающую с точкой приложения силы) при пролетах «среза» больше двух.

Экспериментально подтверждена правомерность использования гипотезы плоских сечений для средних деформаций рабочей арматуры и сжатого бетона в каждом из составляющих стержней. В месте шва между бетонами происходят возмущения деформаций, которые представляется возможным заменить условным сосредоточенным сдвигом при экстраполяции гипотезы плоских деформаций каждого слоя в местных зонах, прилегающих к шву.

4. Разработан алгоритм расчета по предлагаемой методике определения расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин в составных железобетонных конструкциях с учетом условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона.

Полученные зависимости учитывают влияние ряда важных факторов, таких как: деформации арматуры в сечении с трещиной, параметры сцепления B арматуры с бетоном, геометрические характеристики сечения и характеристики бетона и арматуры,

деформационный эффект (возникающий в железобетонном элементе после нарушения сплошности), относительные условные сосредоточенные взаимные смещения бетона и арматуры; выяснен многоуровневый характер образования трещин, оказывающий весьма важное влияние на ширину раскрытия трещин.

5. Выполнены численные исследования с использованием накопленного банка опытных данных железобетонных конструкций (монолитного и составного сечения) в широком диапазоне изменения класса и вида бетонов, при различных схемах армирования и изменения расстояния от оси арматуры до растянутой грани элемента, толщины защитного слоя, которые позволили получить сопоставление опытных и расчетных параметров на значения ширины раскрытия трещин с использованием предложенных расчетных зависимостей при учете эффекта нарушения сплошности, уровневых значений расстояний между трещинами, податливости арматурных стержней в пограничном бетонном слое.

Из анализа статистических данных следует, что предлагаемая расчетная методика имеет заметные преимущества по сравнению с нормативной и дает приемлемые результаты в оценке ширины раскрытия наклонных трещин стержневых железобетонных конструкций, о чём свидетельствует коэффициент вариации $C_v = 13,02\%$ для методики автора и значение среднего \bar{X} (1,027), близкого к единице (для сравнения: по нормативной методике коэффициент вариации $C_v=27,57\%$ и значение среднего 0,778).

Основные публикации по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дородных, А.А. Определение параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций при раскрытии наклонных трещин третьего типа [Текст] / А.А. Дородных // Строительство и реконструкция. – 2012. – №4(42). – С. 17 – 23.
2. Дородных, А.А. Ширина раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях [Текст] / Х.З. Баширов, А.А. Дородных // Строительство и реконструкция. – 2012. – №6(44). – С. 3 – 8.
3. К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным трещинам [Текст] / Х.З. Баширов, И.А. Яковенко, А.А. Дородных и др. // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – №6. – С. 2 – 7.
4. Дородных, А.А. Методика экспериментальных исследований прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям [Текст] / А.А. Дородных, И.С. Горностаев, К.М. Чернов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №5. – С. 29 – 32.
5. Дородных, А.А. Методика экспериментальных исследований прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям [Текст] / Н.В. Ключева, А.А. Дородных // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. – №2(30). – С. 18 – 27.

В других изданиях:

1. Дородных, А.А. Методика экспериментального определения параметров деформирования и разрушения железобетонных составных элементов в запредельных [Текст] / Н.В. Ключева, А.А. Дородных // Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном: сборник трудов Международной конференции комплексах.– Брянск, 2010.– Т.2. – С.44-48.
2. Дородных, А.А. Влияние податливости шва на характер разрушения балок, усиленных наращиванием [Текст] / А.А. Дородных // Молодые исследователи – регионам: сборник трудов Всероссийской научной конференции. – Вологда, 2012. – Т.1. – С. 192-193.

Дородных Анна Алексеевна

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ
ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН
В СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать Формат 68x84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Заказ
Юго-Западный государственный университет.
Отпечатано в Юго-Западном государственном
университете. 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.