

На правах рукописи



КРЫЛОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ЖЕСТКОЙ
АРМАТУРОЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (АО «НИЦ Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Травуш Владимир Ильич

Официальные оппоненты: **Федорова Наталия Витальевна**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), профессор кафедры Железобетонных и каменных конструкций, заместитель директора Института строительства и архитектуры по науке

Андросова Наталия Борисовна,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» (ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»), исполняющая обязанности заведующего кафедрой Городского хозяйства и строительства автомобильных дорог

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»)

Защита состоится «26» декабря 2019 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

Актуальность темы исследования. В условиях стремительного развития строительной отрасли, возрастающих темпов строительства, увеличения высотности зданий появилась необходимость в новых материалах и конструкциях, обладающих повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками. Этим требованиям в полной мере соответствует комбинация высокопрочного железобетона и жесткой арматуры, образующих сталежелезобетонные конструкции. При грамотном проектировании и обеспечении совместной работы компонентов сталежелезобетонной конструкции (стали и бетона) существенно снижается общий вес сооружения, увеличивается полезная площадь.

Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные, относящиеся к конструкциям из сталежелезобетона, весьма обширны. Однако, особенности работы высокопрочных бетонов в композитных сталежелезобетонных изгибаемых конструкциях недостаточно исследованы. Поэтому, для обеспечения безопасности строительных конструкций, вопросы работы балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов, в том числе полностью обетонированных, являются актуальными. Кроме того, актуальным является подтверждение достоверности результатов аналитических и численных расчетов таких конструкций с помощью современных расчетных методик и программных комплексов.

Степень разработанности темы. Вопросам работы на изгиб сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой посвящены исследования многих зарубежных и отечественных ученых. Большая часть исследовательских работ выполнена для бетонов низкой и нормальной прочности – для бетонов класса по прочности на сжатие до В60. Вопросы аналитических расчетов железобетонных конструкций с жесткой арматурой, в том числе работающих на изгиб, довольно подробно описаны и задокументированы в соответствующих отечественных (СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования) и зарубежных (EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures) нормах проектирования.

Однако, экспериментальные исследования и соответствующие рекомендации с описанием особенностей работы и расчетов изгибаемых сталежелезобетонных конструкций, запроектированных с применением высокопрочных бетонов отсутствуют. Вопрос особенностей работы бетонов высокой прочности в сочетании с жесткой арматурой недостаточно исследован и не включен в соответствующие нормативные документы.

Цель диссертационной работы – совершенствование существующих методик расчета несущей способности изгибаемых сталежелезобетонных конструкций из высокопрочных бетонов на основе выполненных экспериментальных исследований, использования современных численных методов и компьютерного моделирования.

Задачи диссертационной работы

1. Экспериментальные исследования балок из высокопрочных бетонов с жесткой арматурой для определения их несущей способности, вертикальных перемещений, картины трещинообразования и характера разрушения.

2. Компьютерное моделирование и визуализация процесса разрушения изгибаемых конструкций с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов. Сравнение и оценка точности результатов численных расчетов на основе экспериментальных данных.

3. Оценка точности и применимости нормативных методик расчета к изгибаемым железобетонным конструкциям с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов на основе экспериментальных данных.

4. Совершенствование современной нормативной методики расчета нормальных сечений железобетонных элементов по прочности на действие изгибающих моментов и продольных сил. Уточнение нормативных зависимостей и коэффициентов.

5. Совершенствование методики расчета прочности изгибаемых железобетонных конструкций при действии поперечных сил; строгое теоретическое обоснование предложенных решений.

Объект исследования – железобетонные балки с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов.

Предмет исследования – методики расчета прочности железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов.

Научная новизна работы

1. Выявлены закономерности работы и разрушения балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов.

2. Дана теоретическая и экспериментальная оценка точности современных нормативных методик и расчетных допущений применительно к балкам с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов.

3. Предложены дополнения и развитие методики расчета прочности нормальных сечений железобетонных элементов, в том числе с многорядным расположением стержневой арматуры и с жесткой арматурой, на действие изгибающих моментов и продольных сил.

4. Разработана теоретически обоснованная методика расчета прочности изгибаемых железобетонных конструкций при действии поперечных сил.

Теоретическая значимость работы

1. Установлено, что выявленные экспериментальным путем закономерности поведения железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов достаточно точно описываются нормативными зависимостями, принятыми для конструкций из бетонов низкой и нормальной прочности.

2. Экспериментально выявлен новый вид разрушения моделей с жесткой арматурой, который можно рассматривать как новый вид предельного состояния, относящегося к первой группе.

3. Экспериментально подтверждено, что использование для расчетов балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов нелинейной деформационной

модели может привести к погрешностям при детальном анализе НДС конструкции в связи с несоблюдением гипотезы плоских сечений и увеличением предельных относительных деформаций бетонов по сравнению с нормируемыми величинами.

4. Предложены и теоретически обоснованы дополнения и развитие методики расчета прочности нормальных сечений железобетонных элементов с многорядным расположением стержневой арматуры и с жесткой арматурой.

5. Предложена методика расчета прочности изгибаемых железобетонных конструкций при действии поперечных сил, имеющая четкое теоретическое обоснование, строго соответствующая всем известным закономерностям работы наклонных сечений, позволяющая учесть различные формы поперечных сечений и продольное армирование.

Практическая значимость работы. Предложенные обобщения и разработки в области расчетов прочности железобетонных и сталежелезобетонных конструкций позволяют более правильно описать работу конструкций, получить конечный результат с более высокой степенью точности и повысить безопасность зданий и сооружений. Выполненные теоретические, экспериментальные и численные исследования позволяют повысить эффективность проектирования сталежелезобетонных конструкций, выбирая при этом наиболее рациональные конструктивные решения.

Результаты диссертационного исследования были включены в программу фундаментальных научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на 2017-2019 гг. по направлению «Развитие теоретических основ строительных наук» по теме «Исследование работы железобетонных и сталежелезобетонных балок с применением высокопрочных бетонов».

Методология и методы исследования. В работе использованы методы эмпирического и теоретического исследования. Совершенствование и дополнения существующих расчетных методик выполнено на основе общепринятых положений современной теории железобетона, строгих методов и принципов сопротивления материалов, строительной механики, механики деформируемого твердого тела. Точность полученных результатов оценивалась путем сравнения с известными и полученными в рамках настоящей работы экспериментальными данными. При разработке численных моделей использовались расчетные комплексы ATENA и Femap with NX Nastran.

Личный вклад автора заключается в проведенном анализе отечественных и зарубежных исследований балок с жесткой арматурой; разработке программы, подготовке и проведении экспериментальных исследований; разработке и отладке численных моделей сталежелезобетонных конструкций из высокопрочных бетонов; сравнении данных, полученных экспериментальным, теоретическим и численным путем; разработке и совершенствовании методики расчета нормальных сечений сталежелезобетонных элементов по прочности и методики расчета прочности наклонных сечений с соответствующим теоретическим обоснованием.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований несущей способности, вертикальных перемещений, картины трещинообразования и характера разрушения железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов.

2. Результаты численного моделирования особенностей работы железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов и их сравнение с экспериментальными данными.

3. Развитая методика расчета прочности нормальных сечений железобетонных элементов с многорядным расположением стержневой арматуры и с жесткой арматурой на действие изгибающих моментов и продольных сил.

4. Модель разрушения балок по наклонному сечению.

5. Методика расчета прочности изгибаемых железобетонных конструкций при действии поперечных сил.

Степень достоверности результатов исследований обеспечена соблюдением требований нормативных документов при подготовке и выполнении экспериментальных исследований; обеспечена применением в работе общепринятых положений современной теории железобетона, строгих методов и принципов сопротивления материалов, строительной механики, а также современных численных методов; подтверждается хорошей сходимостью данных экспериментальных, численных и теоретических исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016)» (Казань, 2016);

2. VI Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Владивосток, 2016);

3. Международный форум высотного и уникального строительства 100+ Forum Russia (Екатеринбург, 2017);

4. VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Новосибирск, 2018).

5. I Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и исследователей АО «НИЦ «Строительство». «Научный потенциал строительной отрасли» (Москва, 2019).

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований были использованы при разработке стандарта организации СТО АРСС 11251254.001-018-4 «Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций» (в развитие СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования»), использованы при выполнении расчетов и проектировании несущих конструкций аутригеров многофункционального комплекса «Лахта Центр» в г. Санкт-Петербурге.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 10-ти научных работах по теме диссертации, из которых 8 статей (8,0 печатных листов,

из них 4,0 выполнены лично автором) входят в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации (ВАК РФ), в том числе 4 статьи в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus. Общий объем публикаций составляет 10,0 печатных листов, из них лично автором выполнены 4,9 печатных листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (160 наименований), одного приложения. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста и приложения на 3 страницах, содержит 148 рисунков, 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований и показана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи, отмечена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ нормативно-технической литературы и обзор работ отечественных и зарубежных авторов по исследованиям прочности железобетонных конструкций с жесткой арматурой. Значительный вклад был внесен отечественными учеными – А.А. Гвоздевым, А.П. Васильевым, Н.Н. Стрелецким, В.И. Травушем, Э.Л. Житницкой, Н.А. Егоровым, С.К. Микадзе, а также рядом зарубежных исследователей.

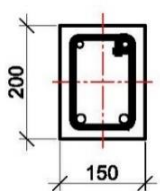
Рассмотрено развитие теории расчетов сталежелезобетонных конструкций, особенности нормативных подходов. Выполнен обзор основных экспериментальных и теоретических исследований. Отмечены достоинства и недостатки существующих расчетных методик по вопросам расчета нормальных сечений железобетонных и сталежелезобетонных балок по прочности на действие изгибающих моментов, а также расчетам прочности конструкций при действии поперечных сил. Установлено, что бóльшая часть научных работ по исследованию балок с жесткой арматурой выполнена для конструкций из бетонов нормальной прочности; что на настоящий момент в теории железобетона имеется ряд расчетных методик, требующих совершенствования и доработки, в том числе методика расчета конструкций при действии поперечных сил и методика расчета прочности нормальных сечений для случая, когда высота сжатой зоны превышает граничное значение.

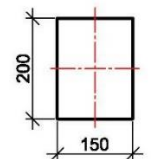
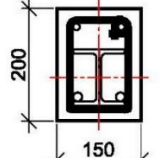
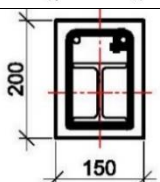
Во второй главе приведены результаты экспериментальных и численных исследований железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов. В рамках работы испытаны 24 модели балок прямоугольного поперечного сечения 200x150 мм длиной 1,5 м. Краткая характеристика моделей приведена в таблице 1, общие виды арматурных каркасов – на рисунках 1, 2.

Класс бетонов по прочности на сжатие, определенный в возрасте 28 суток, находился в диапазоне от В75 до В130, на момент испытания – от В85 до В140.

Испытания моделей выполнены на гидравлическом прессе MAN500 (рисунок 3) в Лаборатории испытания конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (АО «НИЦ «Строительство»).

Таблица 1 – Характеристика моделей

Группа	Арматура	Бетон	μ , % армирования	Коэф. фибрового армирования по объему	Класс бетона (28 сут.)	Общий вид поперечного сечения
Б1	стержневая	высокопрочный	1,86	-	В90	
Б2	стержневая	высокопрочный ФБ*	1,86	0,023	В130	
Б7	стержневая	высокопрочный ФБ с самоупр.ж.	1,86	0,023	В100	

Группа	Арматура	Бетон	μ , % армирования	Коэф. фибрового армирования по объему	Класс бетона (28 сут.)	Общий вид поперечного сечения
Б3	-	высокопрочный ФБ	-	0,023	B130	
Б8	-	высокопрочный ФБ с самоупр.ж.	-	0,023	B105	
Б4	стержневая + жёсткая	высокопрочный	9,13	-	B90	
Б5	стержневая + жёсткая	высокопрочный	9,13	-	B75	
Б6	стержневая + жёсткая	высокопрочный	7,79	-	B90	

* - ФБ - фибробетон



Рисунок 1 – Общий вид жесткой и гибкой арматуры балок групп Б4, Б5



Рисунок 2 – Общий вид арматурных каркасов балок групп Б1, Б2, Б7



Рисунок 3 – Общий вид испытательной установки

Особенности разрушения балок со стержневой арматурой (группы Б1, Б2, Б7). Разрушение моделей Б1 происходило по сжатой зоне с характерным выколом бетона вблизи зоны передачи нагрузки; моделей Б2 – вследствие разрыва растянутой арматуры; моделей Б7 – вследствие раздробления бетона сжатой зоны вблизи зоны передачи нагрузки. Во всех случаях разрушения напряжения в растянутой арматуре достигали предела текучести. Экспериментально полученные величины относительных деформаций сжатого бетона превышали

соответствующие нормируемые значения до 22%. Это объясняется тем, что бетон находился в сложном напряженном состоянии за счет наличия продольного и поперечного армирования.

Особенности разрушения моделей группы №3 (балки с дисперсным армированием без стержневой арматуры Б3, Б8). Разрушение моделей было внезапным, предварительное трещинообразование почти отсутствовало. Эффективность одного только дисперсного армирования рассмотренной стальной фиброй значительно ниже, чем при стержневом армировании, которое играет решающую роль в обеспечении несущей способности изгибаемого элемента.

Особенности разрушения балок с жесткой арматурой (группы Б4, Б5, Б6). Разрушения моделей характеризовались возникновением большого числа вертикальных и наклонных трещин, с последующим сколом бетона в крайних третях пролета балки (рисунок 4). Трещинообразование начиналось на ранних стадиях нагружения. Выявлен нестандартный вид разрушения – скол по поверхности, показанный красным цветом на рисунке 5. Разрушение подобного характера в литературе ранее не рассматривалось. Подобный вид разрушения можно рассматривать как новый вид предельного состояния, относящегося к первой группе, и учитывать его при проектировании конструкций.

Напряжения в жесткой и стержневой арматуре перед разрушением достигали предела текучести.

В целом, разрушение сталежелезобетонных балок не является внезапным, что имеет большое значение при проектировании реальных конструкций. Вертикальные перемещения моделей приведены на рисунке 6.



Рисунок 4 – Характерное разрушение балок групп Б4, Б5, Б6

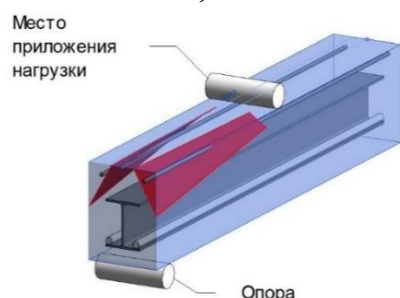


Рисунок 5 – Поверхности скола бетона при разрушении балок групп Б4, Б5, Б6

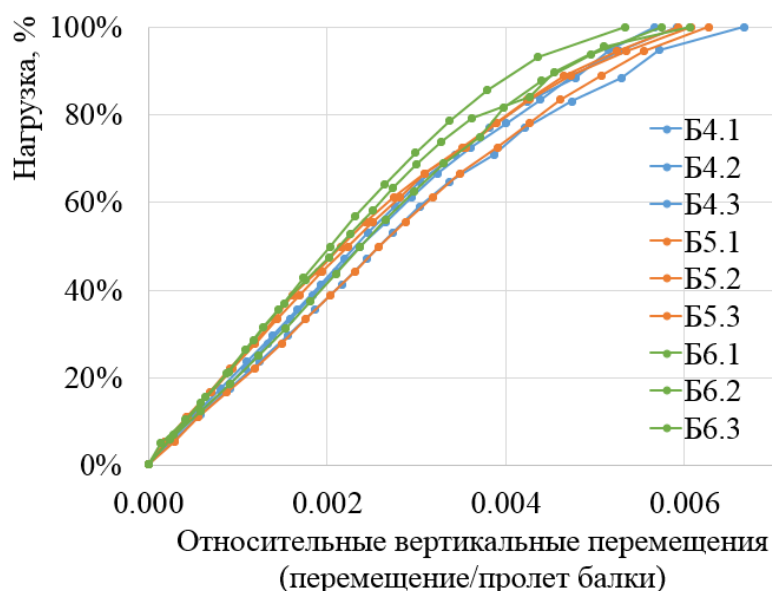


Рисунок 6 – Вертикальные перемещения моделей с жесткой арматурой (группы Б4, Б5, Б6)

Графики относительных деформаций для бетонной и стальной частей моделей, полученные по результатам тензометрических измерений, приведены на рисунках 7, 8. Гипотеза плоских сечений соблюдалась вплоть до суммарной нагрузки на модели (в % от разрушающей) 60%, 55% и 64% для балок групп Б4, Б5 и Б6 соответственно.

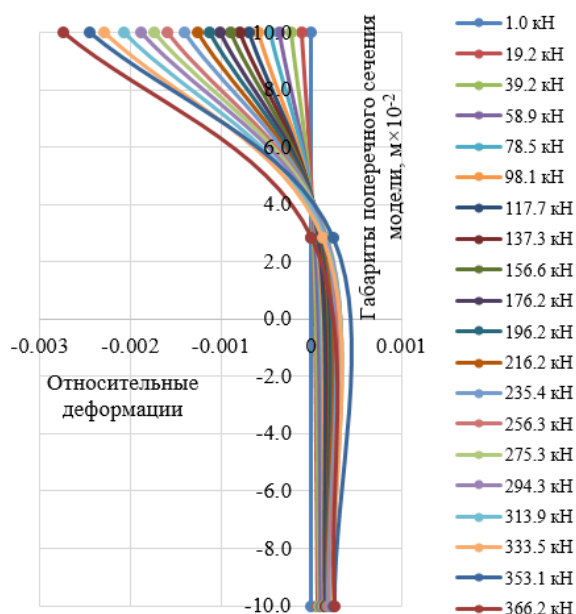


Рисунок 7 – Относительные деформации бетона моделей Б5 по ступеням нагружения в середине пролета

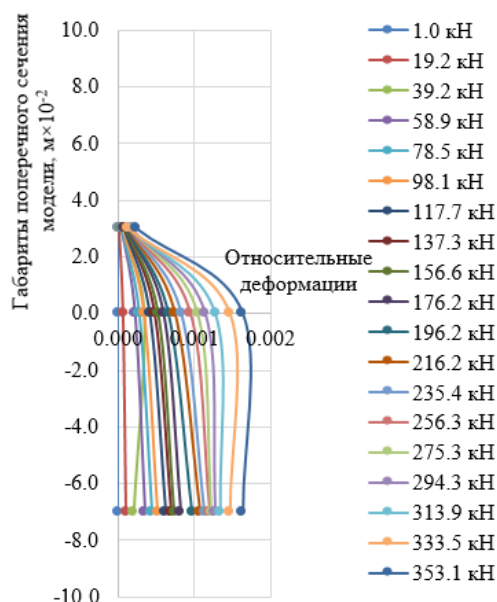


Рисунок 8 – Относительные деформации жесткой арматуры моделей Б5 по ступеням нагружения в середине пролета

Для всех экспериментальных моделей выполнена теоретическая оценка полученных результатов. Расчеты по нормативной методике выполнены с рядом уточнений, дающих возможность более строгого определения граничной высоты сжатой зоны железобетонных сечений с жесткой арматурой и позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние конструкции более корректно. Получено хорошее совпадение опытных и расчётных результатов (наибольшее отличие – 6,1%). Тем самым подтверждено, что, несмотря на сложный характер работы жёсткой арматуры в составе сталежелезобетонного сечения, формулы действующего СП 266.1325800 и СТО АРСС 11251254.001-018-4 пригодны для определения прочности нормальных сечений. В основе отмеченных уточнений расчетной методики лежит отдельное рассмотрение каждого слоя стержневой (жесткой) арматуры и определение для него своей собственной граничной высоты сжатой зоны x_R (рисунок 9).

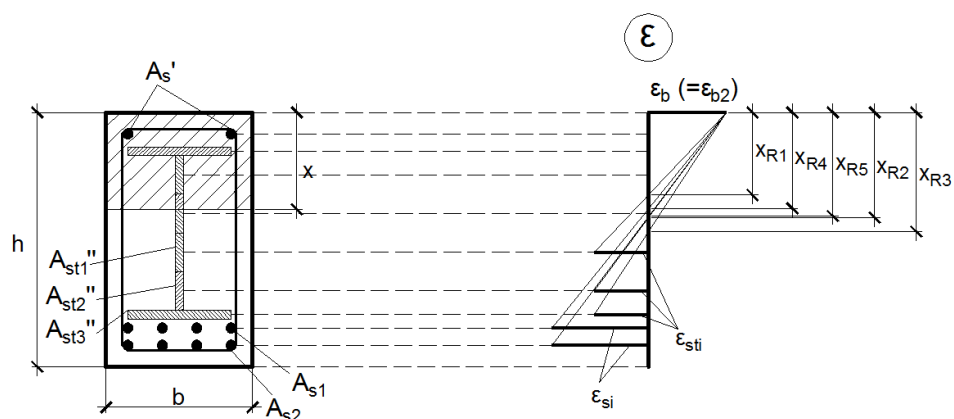
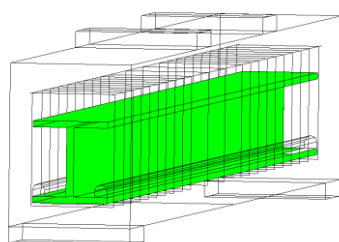
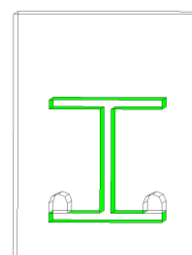


Рисунок 9 – Изгибаемое сталежелезобетонное сечение. Определение граничной высоты сжатой зоны

Компьютерное моделирование и численные расчеты балок. Для детального изучения особенностей работы железобетонных и сталежелезобетонных балок, а также для подтверждения справедливости расчетных методик и гипотез применительно к высокопрочным бетонам было выполнено численное моделирование испытанных конструкций. Расчеты выполнены методом конечных элементов. Характер работы арматуры и бетона описан фактическими диаграммами деформирования материалов. Расчеты выполнены с учетом образования и раскрытия трещин в растянутой части бетонного сечения. Также учитывалось контактное взаимодействие компонентов сталежелезобетонных конструкций. Параметры контактного слоя заданы по результатам экспериментальных исследований, а также с учетом рекомендаций СП 266.1325800 и EN 1994-1-1 (2004): Eurocode 4. Контактная область была введена по всему контуру стального сердечника (для моделей группы Б6), за исключением мест сопряжения с приваренными арматурными стержнями, расположенными на нижних полках двутавров (для моделей групп Б4, Б5) – рисунок 10.



а) общий вид модели контактного слоя



б) поперечное сечение (конструктивная и поперечная арматура не показана)

Рисунок 10 – Моделирование контактного слоя

Результаты расчетов балок с жесткой арматурой групп Б4, Б5 с абсолютным сцеплением стали и бетона приведены на рисунках 11-13, графики «нагрузка-перемещение» - на рисунке 14.

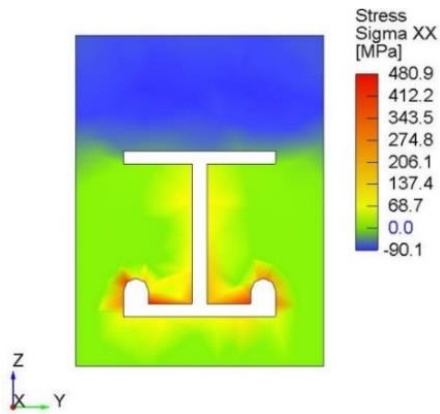


Рисунок 11 – Напряжения в бетоне модели вдоль оси X (сечение по центру балки), МПа

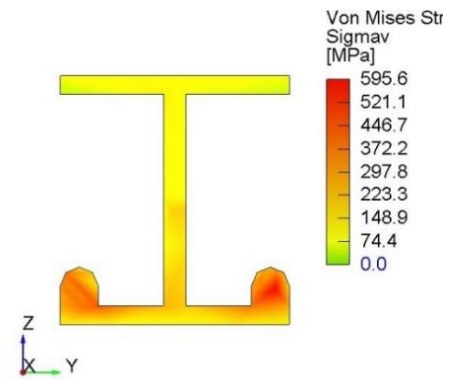


Рисунок 12 – Напряжения в стальном сердечнике модели (сечение по центру балки), МПа

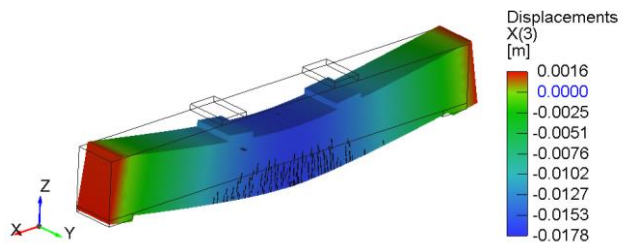


Рисунок 13 – Деформированная конструкция с трещинами, вертикальные перемещения, м

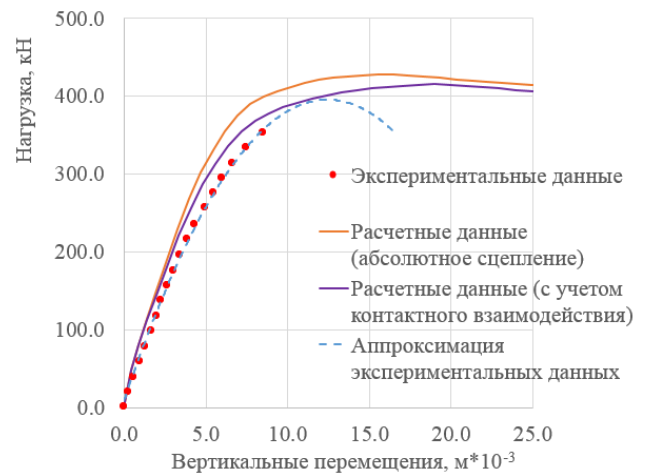


Рисунок 14 – Графики «нагрузка-перемещение» для моделей группы Б5

Наиболее точно поведение экспериментальных конструкций описывается численными моделями с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном (рисунок 14). В целом, по материалам анализа экспериментальных и расчетных данных обе модели (с учетом и без учета контактного взаимодействия) хорошо описывают работу сталежелезобетонной конструкции. Отличие по разрушающим нагрузкам находится в пределах 12%.

В третьей главе рассмотрены вопросы совершенствования расчета нормальных сечений сталежелезобетонных элементов по прочности на действие изгибающих моментов и продольных сил. Подробно рассмотрен подход, реализованный в СП 63.13330, для случая изгиба и внецентренного сжатия железобетонного элемента, когда относительная высота сжатой зоны больше граничной ($\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$). В рассматриваемом случае высоту сжатой зоны, согласно СП 63.13330, предписывается определять по формуле:

$$x = \frac{N + R_s A_s \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} A'_s}{R_b b + \frac{2 R_s A_s}{h_0 (1 - \xi_R)}} \quad (1)$$

Проанализируем это уравнение. Запишем (1) в строку, получив при этом уравнение равновесия в виде проекции всех сил на продольную ось для рассматриваемого поперечного сечения элемента и перейдем от ξ_R к x_R :

$$R_b b x - N + R_{sc} A'_s - R_s A_s \left(\frac{h_0 + x_R - 2x}{h_0 - x_R} \right) = 0 \quad (2)$$

В уравнении равновесия (2) можно обозначить:

$R_s A_s \left(\frac{h_0 + x_R - 2x}{h_0 - x_R} \right) = N_s$ – усилие в растянутой арматуре;

$R_b b x = N_b$ – усилие в бетоне;

$R_{sc} A'_s = N_{sc}$ – усилие в сжатой арматуре.

Перепишем слагаемое, характеризующее усилие в растянутой арматуре в формуле (2), в виде:

$$N_s = R_s A_s \frac{(h_0 - x) - (x - x_R)}{h_0 - x_R} \quad (3)$$

Анализ формул (1, 2, 3) показывает следующее:

- справедливы не для любых значений x , x_R , h_0 . Из формулы (3) видно, что при $(x - x_R) > (h_0 - x)$ (4)

усилия в растянутой арматуре становятся сжимающими.

Например, положив $x_R = 0.5h_0$, выражение (4) примет вид:

$x - 0.5h_0 > h_0 - x$ или $x > 0.75h_0$

То есть, при $x = 0.75h_0$ усилия в растянутой арматуре обращаются в «0», а при $x > 0.75h_0$ становятся сжимающими.

- не может быть корректно использована при наличии в поперечном сечении жесткой арматуры;
- не может быть корректно использована при многослойном армировании (т.к. в части стержней напряжения могут не достигать предела текучести, а в другой – равняться пределу текучести; вычисления относительно центра тяжести растянутой арматуры при этом дают погрешность).

Далее представлена доработка и развитие нормативного подхода. Рассмотрим эпюру относительных деформаций ϵ и запишем строгие геометрические зависимости для **простого случая сжато-изогнутого железобетонного элемента** (рисунок 15). Будем полагать, что величины напряжений в арматурных стержнях не достигли расчетного сопротивления материала.

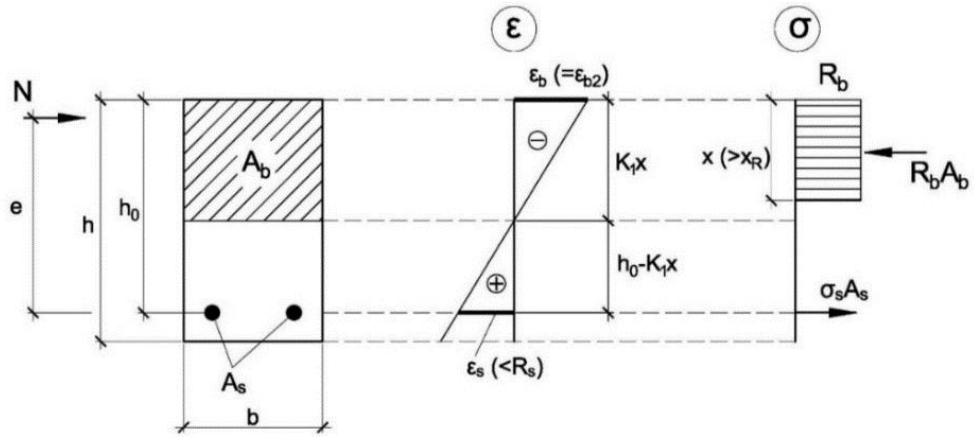


Рисунок 15 – Сжато-изогнутый железобетонный элемент. Эпюры напряжений и относительных деформаций

Записав уравнение равновесия продольных сил и учитывая коэффициент перехода от фактической эпюры напряжений к расчетной прямоугольной, получим квадратное уравнение для вычисления высоты сжатой зоны сечения (5).

$$R_b b K_1 x^2 + (A_s E_s \varepsilon_{b2} - N) K_1 x - A_s E_s \varepsilon_{b2} h_0 = 0 \quad (5)$$

Уравнение (5) является квадратным уравнением общего вида: $ax^2 + bx + c = 0$, где a, b, c – коэффициенты; корни уравнения вычисляются как $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$. Полученное выражение для определения высоты сжатой зоны (5) лишено недостатков, отмеченных для формулы СП (1).

Аналогичные выражения получены для более сложных случаев компоновки поперечных сечений железобетонных элементов и приведены далее.

Сжато-изогнутый сталежелезобетонный элемент (с жесткой арматурой) с учетом многорядного расположения арматурных стержней. Будем рассматривать случай, когда величины напряжений в части растянутых и сжатых арматурных стержней, и жесткой арматуры достигли расчетного сопротивления материала, в части – не достигли (рисунок 16).

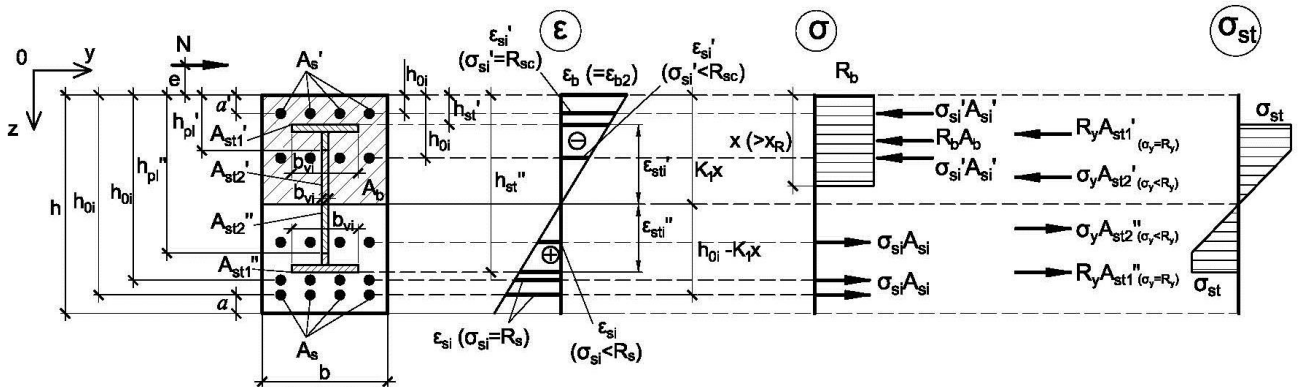


Рисунок 16 – Сжато-изогнутый сталежелезобетонный элемент (с жесткой арматурой) с учетом многорядного расположения арматурных стержней

Формула для определения высоты сжатой зоны:

$$\begin{aligned}
& R_b b x - R_b (A'_s + A'_{st1} + A'_{st2}) + E_s \varepsilon_{b2} A'_{si(\sigma_s < R_{sc})} - \frac{E_s \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} \sum_{i=1}^n A'_{si(\sigma_s < R_{sc})} h_{0i} + \\
& + \sum_{i=1}^n R_{sci} A'_{si(\sigma_s = R_{sc})} + R_{st} A'_{st1(\sigma_{st} = R_{st})} + E_{st} \varepsilon_{b2} A'_{st2(\sigma_{st} < R_{st})} - \frac{E_{st} \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} S'_{st20Y(\sigma_{st} < R_{st})} - \\
& - \frac{E_s \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} \sum_{i=1}^m A_{si(\sigma_s < R_s)} h_{0i} + E_s \varepsilon_{b2} A_{si(\sigma_s < R_s)} - \sum_{i=1}^m R_{si} A_{si(\sigma_s = R_s)} - R_{st} A''_{st1(\sigma_{st} = R_{st})} - \\
& - \frac{E_{st} \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} S''_{st20Y(\sigma_{st} < R_{st})} + E_{st} \varepsilon_{b2} A''_{st2(\sigma_{st} < R_{st})} + N = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

Формула для определения предельного момента:

$$\begin{aligned}
M_{ult} = & R_b S_b + E_s \varepsilon_{b2} S'_{si(\sigma_s < R_{sc})} - \frac{E_s \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} \sum_{i=1}^n S'_{si(\sigma_s < R_{sc})} h_{0i} + \sum_{i=1}^n R_{sci} S'_{si(\sigma_s = R_{sc})} + \\
& + R_{st} S'_{st1(\sigma_{st} = R_{st})} + E_{st} \varepsilon_{b2} S'_{st2(\sigma_{st} < R_{st})} - \frac{E_{st} \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} S'_{st20Y(\sigma_{st} < R_{st})} h'_{st2} - \\
& - \frac{E_s \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} \sum_{i=1}^m S_{si(\sigma_s < R_s)} h_{0i} + E_s \varepsilon_{b2} S_{si(\sigma_s < R_s)} - \sum_{i=1}^m R_{si} S_{si(\sigma_s = R_s)} - R_{st} S''_{st1(\sigma_{st} = R_{st})} - \\
& - \frac{E_{st} \varepsilon_{b2}}{K_1 \chi} S''_{st20Y(\sigma_{st} < R_{st})} h''_{st2} + E_{st} \varepsilon_{b2} S''_{st2(\sigma_{st} < R_{st})} \leq N e,
\end{aligned} \tag{7}$$

В предлагаемые формулы для определения высоты сжатой зоны и предельного момента входит величина коэффициента полноты эпюры напряжений. Его величина определена как в отечественных (СП 311.1325800), так и в зарубежных (Fib Model Code for Concrete Structures 2010) нормативных документах. Выполнена оценка значений коэффициентов и их уточнение. Выполненные вычисления показали, что наиболее опасный случай (наименьшее значение ξ_R) представляют собой величины, полученные на основе средних значений прочностных характеристик материала. Разница в величинах граничной высоты сжатой зоны может изменяться в пределах от 10 до 20% для разных классов бетона по сравнению с нормируемыми значениями.

Рассмотрена возможность аппроксимации фактической эпюры напряжений в сжатой зоне высокопрочных бетонов различными геометрическими формами – прямоугольной и треугольной. Несмотря на отличия в очертаниях, прямоугольная эпюра дает приемлемые результаты.

В четвертой главе рассмотрены вопросы прочности наклонных сечений изгибаемых сталежелезобетонных элементов при действии поперечных сил. Все современные расчетные формулы основываются на эмпирических и полуэмпирических зависимостях, что позволяет получить конечный результат с целым рядом ограничений (не учитывается поперечная составляющая в

продольной арматуре, не учитываются различные формы поперечных сечений (кроме прямоугольной). Отмеченные упрощения и эмпирический подход являются следствием недостаточного количества уравнений равновесия для нахождения всех неизвестных.

На основе изучения экспериментальных и численных данных предлагается методика расчета прочности сталежелезобетонных элементов при действии поперечных сил, учитывающая особенности напряженно-деформированного состояния сжатого бетона над наклонной трещиной. Рассмотрим наиболее распространённый случай разрушения железобетонного элемента от действия поперечных сил – в результате исчерпания несущей способности (раздробления) сжатого бетона над трещиной. Выделим два этапа в работе конструкции.

Этап 1. Образование наклонной трещины.

Предлагается расчётная модель, в которой непосредственно перед образованием наклонной трещины первые главные (растягивающие) напряжения в бетоне равномерно распределены вдоль расчётного наклонного сечения вплоть до сжатой зоны бетона (рисунок 17). Их вертикальная проекция уравнивает поперечную силу Q . Бетон работает с расчётными сопротивлениями R_b и R_{bt} . Его напряжённое состояние в сжатой зоне является условно одноосным. На этом этапе формируется сжатая зона бетона и, соответственно, определяется её высота из условия равенства нулю суммы проекций всех сил на продольную ось элемента. Продольная арматура при необходимости учитывается с помощью приведения её к бетону по жёсткости, то есть вычисляется приведенная площадь, исходя из соотношения модулей упругости. При этом нагельный эффект продольного армирования в предлагаемой методике не учитывается.

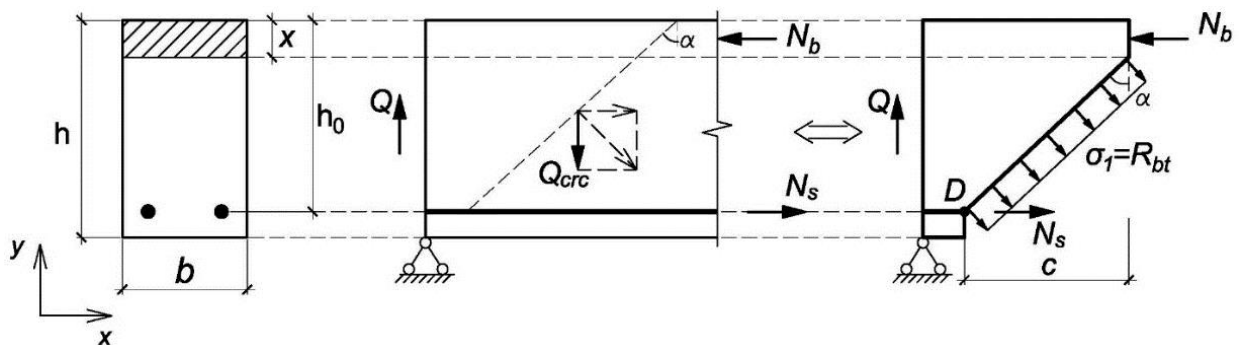


Рисунок 17 – Равновесие участка железобетонной балки при образовании наклонной трещины

Этап 2. Развитие наклонной трещины и разрушение конструкции. В сжатой зоне сечения над трещиной напряженное состояние бетона становится трёхосным (рисунок 18).

Изменение напряженно-деформированного состояния материала приводит к существенному изменению его прочностных и деформационных характеристик. Для уточнения была построена численная модель. Выполнено моделирование железобетонной шарнирно опёртой балки с трещиной в приопорной зоне. Выявлено, что вертикальные напряжения в сжатой зоне бетона над трещиной в

несколько раз меньше горизонтальных, действующих вдоль и поперек оси балки. Это позволяет вертикальными напряжениями пренебречь и классифицировать состояние бетона над трещиной, как условно двухосное.

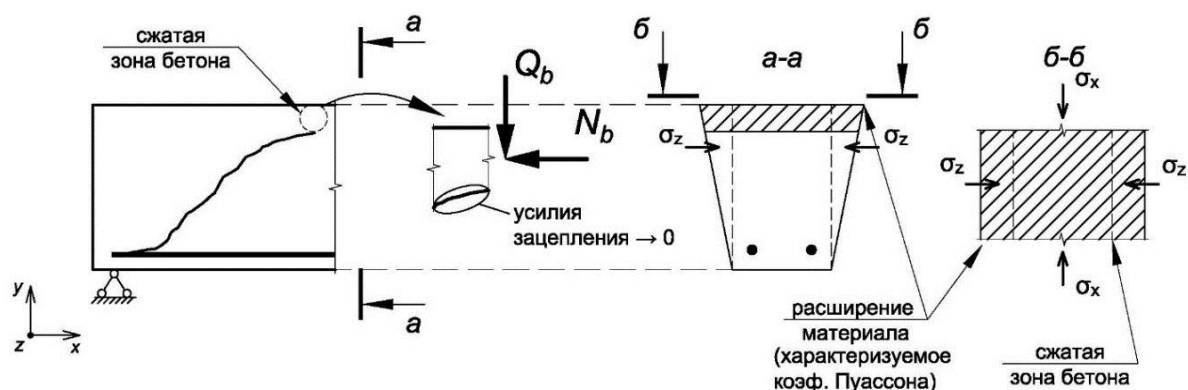


Рисунок 18 – Усилия в сжатой зоне бетона над трещиной перед потерей несущей способности элемента

По данным Г. А. Гениева предел прочности при полученном соотношении между главными напряжениями σ_1 и σ_2 возрастает до 1,61 раз. Это означает, что предельно допустимая поперечная нагрузка будет в 1,61 раза больше, чем для первого этапа работы элемента – случая образования трещины. Эти данные соответствуют экспериментальным исследованиям и СП 63.13330.

Предельная поперечная нагрузка на элемент определяется из уравнения (8).

$$Q_{b,ult} = \frac{N_b(h_0 - 0.5x)}{c}, \quad (8)$$

где

$$N_b = \sigma_b bx = 1.61 R_b bx \quad (9)$$

В ходе расчетов следует проверять, что напряжения в растянутой арматуре меньше расчетного сопротивления стали. В противном случае необходимо уточнить усилие N_b из условия равенства напряжений в арматуре величине R_s .

Достоинства предложенной методики расчёта:

1. позволяет описать процесс разрушения наклонного сечения в строгом соответствии с известными опытными данными;
2. при значительном продольном армировании метод позволяет учесть влияние продольной арматуры на прочность наклонного сечения;
3. для поперечных сечений, отличающихся от прямоугольных (тавровых, двутавровых, круглых, произвольных симметричных сечений), предложенный подход позволяет получить значительно более точные результаты.

В случае наличия в железобетонном элементе жесткой арматуры, ее следует рассматривать, как набор вертикальных и горизонтальных арматурных стержней.

Для оценки работы железобетонных конструкций по наклонному сечению были созданы численные модели. Результаты расчетов приведены на рисунке 19-20 и в таблице 2.

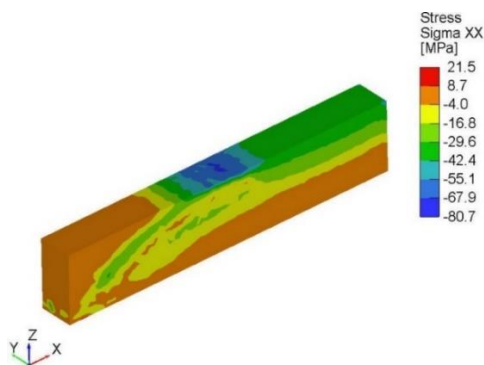


Рисунок 19 – Горизонтальные напряжения (вдоль оси балки) N_x , МПа

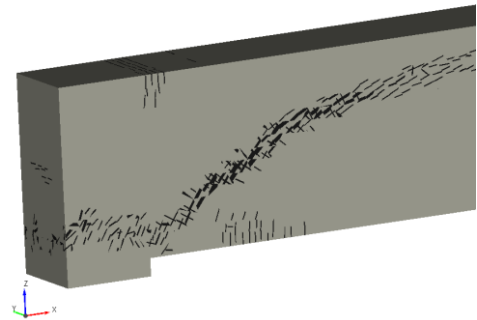


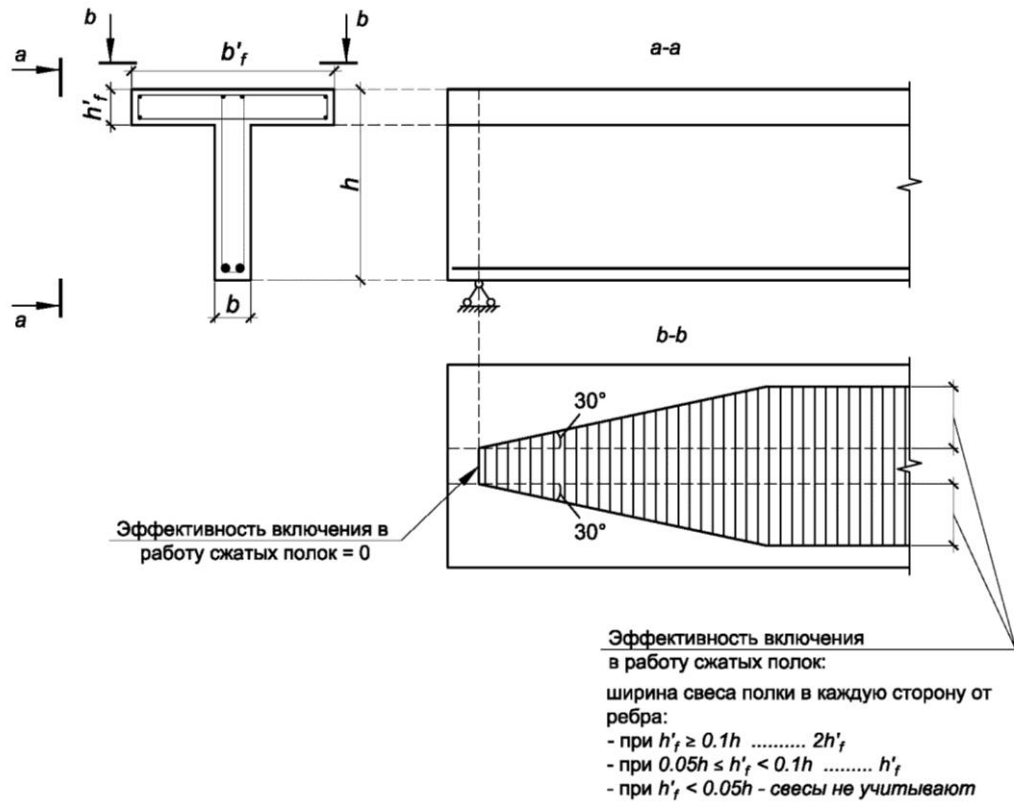
Рисунок 20 – Картина трещинообразования

Таблица 2 – Сравнение результатов численных и нормативных расчетов

Продольн. арматура	Предельная поперечная сила, воспринимаемая наклонным сечением, кН			Отклонение от СП 63, %		
	численный расчет	СП 63.13330		предлагаемая методика	численный	предлагаемая методика
		при расчете на действие поперечных сил	при расчете на действие моментов			
ø 16 A500	81.9	55.3	155.4	72.6	48.1	31.3
ø 8 A500	52.0	55.3	42.5	42.5	22.4	0

В таблице 2 сравнение с СП выполнено для наиболее опасного случая разрушения (действие поперечной силы или момента). По материалам таблицы 2 видно, что результаты расчетов балок с малым процентом армирования по предлагаемой методике полностью совпадают с нормативными величинами. При бóльших процентах армирования ($\mu=2,0\%$) расхождение с результатами расчетов по нормам достигает 31%. Это объясняется тем, что нормативная методика не учитывает влияние продольного армирования на несущую способность наклонных сечений.

Учет наличия бетонных полок. Эффективность включения в работу сжатых свесов консольных полок предлагается принимать в соответствии с рисунком 21.



Примечание – если $b < h'_f$, то в приведенных соотношениях вместо h'_f следует принимать b

Рисунок 21 – Эффективность включения в работу сжатых свесов консольных полок для элементов таврового сечения при расчете на действие поперечных сил

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор основных экспериментальных и теоретических исследований сталежелезобетонных конструкций. Отмечены достоинства и недостатки существующих расчетных методик применительно к железобетонным и сталежелезобетонным конструкциям. Бóльшая часть научных работ по исследованию балок с жесткой арматурой выполнена для конструкций из бетонов нормальной прочности. Полная информация о работе высокопрочных бетонов в составе изгибаемых комбинированных конструкций отсутствует. Эти факторы явились основанием для выполнения исследований, отраженных в диссертационной работе.
2. Экспериментальные исследования подтвердили справедливость и применимость существующих нормативных методик к расчетам конструкций из высокопрочных бетонов. В то же время, обнаружено нарушение гипотезы плоских сечений и превышение предельных относительных деформаций сжатого бетона в моделях, что может привести к погрешностям при использовании нелинейной деформационной модели при детальном анализе НДС конструкции.
3. По результатам выполненных экспериментальных исследований выявлен новый вид разрушения моделей с жесткой арматурой, представляющий собой скол бетона по сложной поверхности в крайних третях пролета балки.
4. Результаты численных экспериментов позволяют детально оценить характер напряженно-деформированного состояния конструкций и имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными. Наиболее точно отражают характер работы сталежелезобетонных конструкций модели, выполненные с учетом контактного взаимодействия между стальным сердечником и бетоном.
5. Выполнено совершенствование формул расчета нормальных сечений сталежелезобетонных элементов по прочности на действие изгибающих моментов и продольных сил. Приведено четкое геометрическое обоснование полученных зависимостей. Уточнённая методика распространена на различные варианты армирования поперечного сечения, в том числе, с применением жесткой арматуры.
6. Предложена новая модель работы железобетона при расчетах прочности наклонных сечений; разработана методика расчета железобетонных элементов (в том числе с жесткой арматурой) при действии поперечных сил, строго соответствующая физике явления. Предложена возможность учета в расчетах на поперечную силу продольного армирования и различных форм поперечных сечений.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований

1. Хорошее совпадение результатов численных расчетов с экспериментальными данными дают возможность использовать построенные компьютерные модели и создавать аналогичные для решения более широкого круга инженерных задач.

2. Перспективным направлением является постановка экспериментов для оценки особенностей работы высокопрочных бетонов в изгибаемых сталежелезобетонных конструкциях при рассмотрении предельных состояний второй группы. При этом важно оценить характер совместной работы компонентов сечения. На основании поставленных экспериментов представляется возможность доработки существующих методик расчета сталежелезобетонных конструкций по предельным состояниям второй группы.
3. Предложенная методика расчета железобетонных и сталежелезобетонных конструкций по наклонным сечениям должна быть экспериментально подтверждена для бетонов высокой и сверхвысокой прочности, работающих в составе сложного сталежелезобетонного поперечного сечения.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ:

1. Крылов, А. С. Численные расчеты сталежелезобетонных балок с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном / А. С. Крылов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 175-184.
2. Крылов, С. Б. О новом руководстве по проектированию сталежелезобетонных конструкций (в развитие СП 266.13330.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования) / С. Б. Крылов, В. А. Семенов, Д. В. Конин, А. С. Крылов, Л. С. Рожкова // Academia. Архитектура и строительство. – 2019. – № 1. – С. 99-106.
3. Травуш, В. И. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб / В. И. Травуш, Д. В. Конин, А. С. Крылов, С. С. Каприелов, И. А. Чилин // Строительство и реконструкция. – 2017. – №4 (72). – С. 63-71.
4. Krylov, A. S. Adhesion of components of composite steel and concrete cross section in analysis of beam with concrete encased section / A. S. Krylov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2019. – Vol. 15. – No. 2. – С. 65-71.
5. Krylov, A. S. Determination of the limit height of the compressed zone of steel-concrete composite sections / A. S. Krylov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2019. – Vol. 15. – No. 2. – С. 72-76.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus:

6. Krylov, S. B. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks [Электронный ресурс] / S. B. Krylov, V. I. Travush, D. V. Konin, A. S. Krylov // IOP Conference Series. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1–8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 456. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/456/1>.

7. Travush, V. I. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete / V. I. Travush, D. V. Konin, A. S. Krylov // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 3 (79). – P. 36-44.
8. Travush, V. I. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete / V. I. Travush, D. V. Konin, A. S. Krylov // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 1 (77). – P. 90-100.
9. Travush, V. I. Ultimate state of the support zone of reinforced concrete beams / V. I. Travush, S. B. Krylov, D. V. Konin, A. S. Krylov // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 7 (83). – P. 165-174

Публикации в других изданиях:

10. Конин, Д. В. Испытания балочных конструкций с применением высокопрочных бетонов и сталефибробетонов / Д. В. Конин, А. С. Крылов // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 3(18). – С. 79-90.