

На правах рукописи

Есипов Станислав Максимович

**УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНИМ КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ С
УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Белгород 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель: **Меркулов Сергей Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Официальные оппоненты: **Трекин Николай Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
АО «ЦНИИПромзданий», начальник отдела
конструктивных систем

Арленинов Петр Дмитриевич,
кандидат технических наук,
Научно-исследовательский, проектно-
конструкторский и технологический институт
бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева,
заместитель заведующего лабораторией
механики железобетона

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский
институт строительной физики Российской
академии архитектуры и строительных
наук» (НИИСФ РААСН) (г. Москва)**

Защита состоится «17» февраля 2021 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, (7 корпус, Минаевский пер. д.2, ауд. 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Российский университет транспорта".

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ФГАОУ ВО "Российский университет транспорта".

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шавыкина
Марина Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время происходят масштабные преобразования в сферах экономики и производства, внедрения новой техники и технологии. Это влечёт появления и апробации инноваций в сфере строительства. Реконструкция и технологическое перевооружение зачастую связаны с увеличением нагрузки от оборудования и транспорта на несущие конструкции, а также с необходимостью перепланировки. Для жилых и общественных зданий характерно проведение реконструкции в виде пристроек и надстроек, что требует оценки несущей способности и пригодности к эксплуатации элементов, а, при необходимости, и их восстановления или усиления.

Согласно действующих норм расчёт элементов зданий и сооружений выполняется по методу предельных состояний и не отражает напряжённо-деформированное состояние элемента в стадии эксплуатации, что осложняет проектирование усиления. Выполненный на данное время ряд исследований учитывает влияние факторов по отдельности, но требует экспериментального подтверждения, обоснования и обобщения.

Данная работа посвящена исследованию прочности и деформативности усиленных под нагрузкой железобетонных элементов с учётом истории предварительного нагружения, выявлением предпосылок совместной работы усиливаемого элемента и элемента усиления из композитного материала на основе углеродных волокон. Реализация результатов работы ориентирована на восстановление или повышение силового сопротивления железобетонных элементов.

Актуальность исследований напряжённо-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой внешним композитным армированием определяется отсутствием актуальных методик их расчета.

Целью диссертационной работы является совершенствование методик расчёта прочности, деформативности и определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой внешним композитным армированием.

Для достижения поставленной цели были запланированы **задачи**:

1. Изучить механические характеристики материалов изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой внешним композитным армированием. Разработать программу и методику экспериментальных исследований сопротивления изгибаемых железобетонных элементов, усиленных с различными вариантами предварительного нагружения, а также параметров прочности и деформативности контактной зоны бетон-композит;

2. Провести экспериментальные исследования сопротивления и особенностей работы под нагрузкой изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой внешним композитным армированием. Выявить зависимость силового взаимодействия элемента и внешнего армирования. Установить характер влияния предварительного нагружения на напряжённо-деформированное состояние усиленных элементов.

3. Провести численные исследования работы усиленных под нагрузкой элементов и сопоставить результаты расчёта по предложенной методике с результатами экспериментальных исследований других авторов. Разработать методику расчёта усиления элементов, учитывающую предысторию нагружения, а также методику оценки прочности клеевого соединения на восприятие касательных напряжений. Запатентовать разработанную методику и испытательный образец. Разработать рекомендации по расчёту прочности и деформативности железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой внешним композитным армированием.

Объект исследования – изгибаемые железобетонные элементы, усиленные внешним композитным армированием.

Предмет исследования – напряжённо-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием, и методика расчёта их прочности и деформативности.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, и относится к пункту 3.

Научная новизна исследований:

1. Получены результаты экспериментальных исследований на отрыв внешнего композитного армирования от железобетонного элемента в условиях чистого сдвига. Установлено, что разрушение элемента происходит вследствие потери прочности бетона на срез по плоскости, проходящей по нижней грани нижнего ряда растянутой арматуры. Получены значения предельных касательных напряжений в зоне контакта внешнего армирования с бетоном – 6,9 МПа. Определено, что в момент разрушения, нормальные напряжения во внешнем армировании не превышали 53% от его прочности на растяжение. Установлен диапазон предельных относительных деформаций при разрушении – 0,25...0,28%;

2. Получены результаты экспериментальных исследований усиленных изгибаемых железобетонных элементов, в т.ч. при усилении под нагрузкой. Установлено, что при усилении ненагруженных элементов увеличение несущей способности составляет 40...63%, при усилении элементов, разгруженных после приложения нагрузки – 21...34%, при усилении под нагрузкой – 21...29%. Установлен характер разрушения усиленных элементов – разрушение бетона растянутой зоны по плоскости, проходящей по нижней грани нижнего ряда растянутой арматуры. Определено, что усиление ненагруженных элементов снижает прогибы на

30%, разгруженных после приложения нагрузки – на 10...11%, усиленных под нагрузкой – на 20...28%. При наличии нагрузки, превышающей 70% от разрушающей, внешнее армирование не влияет на жесткость элемента;

3. Установлены зависимости между увеличением несущей способности и жесткости элементов и такими факторами как: наличие и ширина раскрытия трещин, длина анкеровки внешнего армирования, класс бетона по прочности усиливаемого элемента. Разрушение бетона в зоне усиления начинается при ширине раскрытия нормальной трещины – 0,17мм. Эффективная длина анкеровки внешнего армирования составила 300мм;

4. Разработана методика расчёта прочности и деформативности усиленных изгибаемых железобетонных элементов с учётом предыстории нагружения, а также параметров прочности и деформативности контактной зоны бетон-композит;

5. Получены результаты численного исследования, подтвердившие принятые предпосылки расчета о наличии в момент усиления действующих в сечениях элемента усилий, об эффективной длине анкеровки внешнего армирования, о влиянии класса бетона по прочности.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость состоит в том, что было установлено, что внешнее композитное армирование изменяет схему разрушения изгибаемого элемента: потеря несущей способности происходит не от достижения предельных деформаций бетона сжатой зоны и не от потери прочности арматуры на растяжение, а от потери прочности бетона на срез по плоскости, проходящей по нижней грани нижнего ряда растянутой арматуры. Предложенная методика расчёта несущей способности и деформативности усиленных под нагрузкой железобетонных элементов позволяет более полно оценивать силовое сопротивление элементов при реконструкции или усилении зданий и сооружений с учётом предыстории нагружения, а также параметров прочности и деформативности контактной зоны бетон-композит.

Практическая значимость состоит в ускорении процессов реконструкции строительного фонда, т.к. предложенная методика оптимизирует емкость проектирования усиления.

Достоверность проведённых исследований подтверждается использованием классических методов строительной механики, сопротивления материалов, математической статистики, постулатов теории железобетона, использованием сертифицированных расчетно-вычислительных комплексов, поверенного измерительного оборудования, сопоставлением экспериментальных и теоретических результатов исследований. Измерения, проводимые при испытаниях, имеют метрологическое обеспечение, систему дублирования показаний, позволяющих контролировать достоверность результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований силового сопротивления и деформирования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием;
2. Расчётные предпосылки и зависимости для определения прочности и деформативности изгибаемых железобетонных усиленных под нагрузкой элементов с учётом предыстории нагружения, параметров прочности и деформативности контактной зоны бетон-композит;
3. Методика расчёта прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием;
4. Результаты численных исследований влияния вышеуказанных факторов на прочность и деформативность усиленных элементов.

Апробация результатов исследования. Основные положения проведённых исследований по теме диссертации докладывались автором на Международной научно-практической конференции "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям» (г. Москва, 2018 г.), Международных академических чтениях «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (г. Курск, 2014-2019 гг.), XV Международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» (г. Пенза, 2015 г.), Международном молодежном форуме "Образование, наука, производство" (г. Белгород, 2015-2019 гг.), Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (г. Белгород, 2017-2019 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в т.ч. 5 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в журнале, входящем в базу данных SCOPUS, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём диссертации составляет 229 страниц, в том числе: 154 страницы печатного текста, 124 рисунка, 26 таблиц, 133 наименований списка литературы, 4 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи исследования, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов положения, выносимых на защиту.

В первой главе представлен обзор состояния и концепции развития методик усиления и расчёта строительных конструкций. Рассмотрены экспериментальные исследования усиленных элементов. Из приведенного обзора существующих публикаций был сделан вывод, что вопросы прочности и деформативности железобетонных элементов, усиленных композитным внешним армированием, изучены недостаточно. Были выявлены нерассмотренные и нереализованные вопросы и задачи влияния длительного нагружения и работы растянутой зоны бетона, влияние предистории нагружения усиливаемого элемента, оценки напряженно-деформированного состояния контактной зоны «композит-бетон», экспериментальных исследований о влиянии появления вертикальных трещин на отслоение элементов усиления и причины данного явления, вопросы устройства бандажей и анкерующих обойм без разгрузки конструкций. Положения и выводы, полученные в ходе анализа подобных экспериментов, слабо применимы для разработки теории расчета изгибаемых элементов, для которых вопрос оценки сцепления является главенствующим. Было отмечено, что многие авторы исследований получали разнящиеся результаты, несмотря на применение схожих материалов и методик.

Намечены направления дальнейшей разработки темы. Обоснована актуальность задачи аккумулирования экспериментальных данных, необходимых для совершенствования методики расчета усиления железобетонных элементов внешним армированием.

Во второй главе представлены результаты определения прочностных и деформативных характеристик бетона, композитного материала и арматуры. Предложена методика испытания контрольных и усиленных образцов-балок на поперечный изгиб. Изложены результаты экспериментального исследования изгибаемых железобетонных элементов, а также контрольных образцов при кратковременном нагружении, в т.ч. вспомогательных образцов для испытания на отрыв.

Для решения сформулированных задач автором в рамках экспериментальных исследований были предусмотрены испытания основных образцов – железобетонных балок и вспомогательных образцов – бетонных кубов и призм, арматурных стержней, полос из композитного материала, железобетонных блоков с приклеенными полосами из композитного материала. Образцы были изготовлены из тяжёлого бетона класса В20. Размеры опытных образцов составили 100x150(н)x1300 мм. Расчетный пролет составил 1200мм. Конструкция образцов и схема армирования образцов приведена на рисунке 1.

Образцы железобетонных балок были испытаны в 4 серии: Б-1, Б-2, Б-3, Б-4. В серию Б-1 вошли две балки-близнеца Б-1-1 и Б-1-2. Серия Б-1 являлась контрольной.

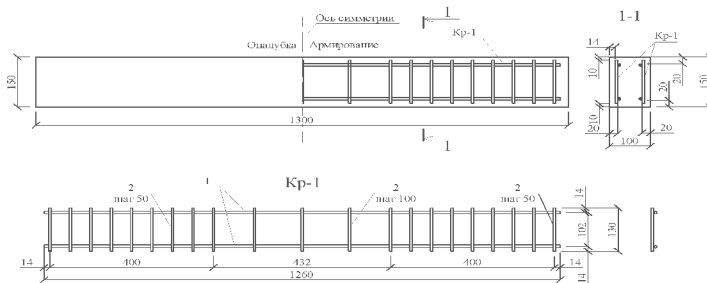
В серию Б-2 вошли две балки Б-2-1 и Б-2-2. Обе балки до испытаний были усилены внешним армированием из приклеенного к нижней грани

однослойного композитного материала шириной 90мм на основе углеродных волокон. На балке Б-2-2 были устроены торцевые хомуты шириной 120мм из аналогичного композитного материала. На балке Б-2-1 хомутов нет.

В серию Б-3 вошли две балки Б3-1 и Б-3-2. Балка Б-3-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50% от разрушающего для серии Б-1, после чего была полностью разгружена и усилена аналогично балке Б-2-2. Балка Б-3-2 была испытана аналогично, но с преднагружением величиной 70% от разрушающего.

В серию Б-4 вошли две балки Б-4-1 и Б-4-2. Балка Б-4-1 была нагружена кратковременной нагрузкой до величины изгибающего момента, равного 50% от разрушающего для серии Б-1, после чего была усилена под нагрузкой аналогично балке Б-2-2. Балка Б-4-2 была испытана аналогично, но усилена под нагрузкой величиной в 70% от разрушающего.

Образцы всех серий были нагружены кратковременной нагрузкой вплоть до разрушения. В качестве расчетной схемы образцов была принята схема с однопролетным шарнирным опиранием по двум сторонам, с 2-мя сосредоточенными силами, равноудаленными от опор. Нагружение велось ступенчато. На этапах, предшествующих разрушению и моменту трещинообразования, величина ступени снижалась для детального рассмотрения напряженно-деформированное состояние элементов. Время выдержки на каждой ступени - 10 мин. Общий вид нагруженного образца приведен на рисунке 2.



Спецификация арматуры

Марка стали	Пит.	Назначение	Ед.изм.	Масса шт., кг	Масса всего, кг
Кр-1	1	Ø8 A400, L=1260	2	0.995	1.601
	2	Ø6 A400, L=130	21	0.606	

Рисунок 1. Опалубочные и арматурные чертежи образцов

С целью обеспечения условий испытания с усилением под нагрузкой балок серии Б-4, была разработана силовая траверса, состоящая из двух прокатных швеллеров и двух тяжей Ø22мм. Траверса монтировалась на нагруженный образец и стягивалась путем закручивания торцевых гаек расчетным моментом с контролируемым падением давления на манометре насосной станции.

Схема расположения измерительных приборов представлена на рисунке 3.



Рисунок 2. Общий вид проведения испытаний

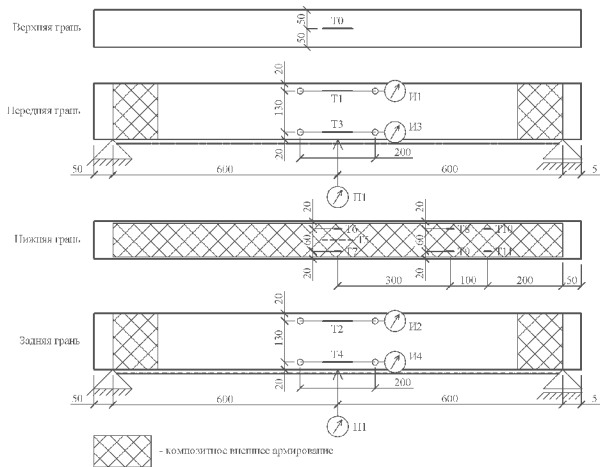


Рисунок 3. Схема расположения измерительных приборов на образцах 2-ой серии

Значения величин предельных изгибающих моментов приведены в таблице 1. Согласно полученным данным для всех образцов серий Б-2, Б-3, Б-4 свойственно повышение несущей способности на восприятие изгибающего момента по сравнению с контрольной серией Б-1. Под величиной $M_{\text{разр}}$ в таблице 1 обозначается величина предельного изгибающего момента неусиленного образца, под величиной $M_{\text{разр}}^{\Gamma}$ – то же, для усиленного образца.

Таблица 1 – Значения предельных изгибающих моментов при испытании образцов на прочность

Серия	Маркировка образца	$M_{\text{разр}},$ кН·м	$M_{\text{разр}}^f,$ кН·м	$\frac{M_{\text{разр}}^f}{M_{\text{разр}}}$	Характер разрушения
Б-1	Б-1-1	7,12	-	-	По нормальным сечениям в зоне чистого изгиба
	Б-1-2	7,19	-	-	
Б-2	Б-2-1	-	10,02	140%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона
	Б-2-2	-	11,63	163%	Разрыв композита в приопорной зоне, раздробление бетона сжатой зоны
Б-3	Б-3-1	-	9,54	134%	Разрыв части волокон композита в приопорной зоне с частичным разрушением защитного слоя бетона.
	Б-3-2	-	8,64	121%	
Б-4	Б-4-1	-	9,2	129%	Проскальзывание композита под анкером
	Б-4-2	-	8,64	121%	Отслоение композита с разрушением защитного слоя бетона

Были установлены следующие характерные зависимости:

- Для образцов серии Б-1 характерен классический характер деформирования. В начале нагружения наблюдается линейный характер зависимости прогиба от изгибающего момента в сечении. При достижении величины изгибающего момента, соответствующего фактическому моменту трещинообразования, происходит перелом линии диаграммы. При достижении величины изгибающего момента, соответствующего разрушающему, напряжения в арматуре достигают предела текучести, наблюдается значительный рост прогибов и деформаций. На этом участке диаграмма имеет линейный характер.

- Для образцов серии Б-2 (рис. 4) характерно увеличение угла наклона к оси абсцисс диаграммы по сравнению с серией Б-1 вследствие повышения изгибной жесткости образца и увеличения момента трещинообразования. Перелом линии диаграммы при появлении первых нормальных трещин находится на диаграмме выше, чем для образцов серии Б-1. При величине изгибающего момента $M=8.64$ кН·м происходит перелом диаграммы, соответствующий началу разрушения защитного слоя бетона и свидетельствующий о начале пластической стадии работы контактной зоны «композит-бетон». Образец Б-2-1 разрушается вследствие отслоения композита с локальным разрушением защитного слоя бетона.

- В образце Б-2-2 к моменту разрушения образца Б-2-1 защитный слой бетона разрушился, адгезия между бетоном и композитом пропала, растянутая зона воспринимает усилия только за счет внешнего армирования, которое заанкерено в торцевых хомутах. Разрушение происходит за счет потери прочности композита на растяжение. Стоит отметить положительное влияние хомутов, которые обеспечивают более полное использование

прочности композита. Образец Б-2-2 после разрушения представлен на рисунке 5.

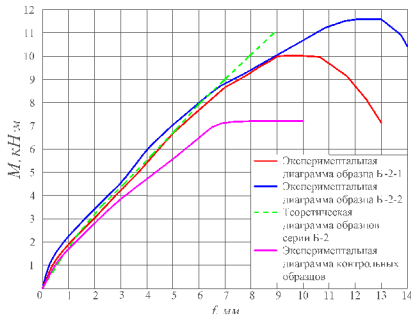


Рисунок 4. Диаграмма "M-f"
(изгибающий момент - прогиб) для
образцов серии Б-2

усиленного образца лежит выше диаграммы контрольного образца и имеет больший угол наклона к оси прогибов. Диаграмма образца Б-3-2 мало отлична от контрольной. Виден лишь прирост несущей способности, деформативность осталась на прежнем уровне. До величины изгибающего момента $M=7,5...8$ кН·м внешнее армирование и бетон работают совместно.

- Образцы серии Б-4 демонстрируют те же закономерности, что и образцы серии Б-3. Если у диаграммы образца Б-4-1 замечен излом и уменьшение деформативности после стадии усиления при нагрузке, равной 50% от разрушающей, вплоть до разрушения, то диаграмма образца Б-4-2 после усиления при нагрузке, равной 70% от разрушающей повторяет диаграмму контрольных образцов.



Рисунок 5. Характерное разрушение образца Б-2-2

Значения моментов трещинообразования для серий Б-3 и Б-4 соответствуют контрольной серии. Появление трещин предшествует усилению. Данные о величине ширины раскрытия нормальных трещин и усредненных расстояний между трещинами в местах пересечения ими

- Образцы серии Б-3 работают под нагрузкой не аналогично серии Б-2 (за исключением предельных моментов) - сказывается разница в величине предварительного нагружения. Чем ближе был образец к разрушению до разгрузки и усиления, тем меньший эффект дает усиление. Диаграмма

образца Б-3-1 после усиления схожа с диаграммой образцов серии Б-2: видно, что диаграмма

продольной арматуры на отдельных этапах нагружения приведены в таблице

2. Значение $M_{\text{эксп}}^{\text{разр}}$ в таблице 2 взято для контрольного образца Б1-1.

Образование нормальных трещин было зарегистрировано во всех образцах в ходе проведения испытаний. Момент образования нормальных трещин определялся визуально, его значения приведены в таблице 2. Согласно полученным данным образование трещин начиналось при величине изгибающего момента, равного:

- 20 % от разрушающего момента в образцах серии Б-1;
- 24...28% от разрушающего момента в образцах серии Б-2;

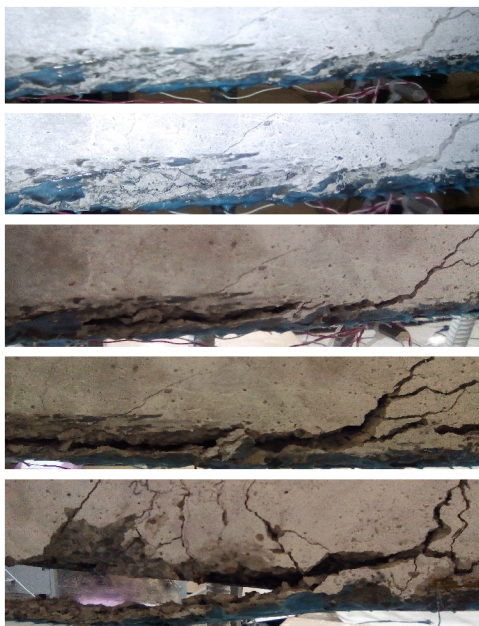


Рисунок 6. Стадии разрушения контактной зоны "композит-бетон" образца Б-3-1 при $M=8...9,5$ кН·м (сверху вниз)

Анализ трещинообразования опытных образцов показал, что усиление уменьшает ширину раскрытия трещин по сравнению с контрольной серией во всем диапазоне изгибающих моментов для серий Б-2 и Б-3. Ширина раскрытия трещин уменьшается на 104-108% в серии Б-2 и 44-67% в серии Б-3. Образцы серии Б-4 не показали изменения параметров трещинообразования по сравнению с контрольной серией. Как видно из рисунка 7, отслоение начинается после образования критической нормальной трещины в защитном слое бетона. Взаимное горизонтальное и вертикальное смещение берегов трещин способствует отслоению.

Трещина пересекает защитный слой бетона до растянутой стальной арматуры и дальше продолжается в горизонтальной плоскости в направлении опор. Величина раскрытия критической трещины к моменту начала отслоения составила 0,16-0,17мм. По данным таблицы 2 был построен график, иллюстрирующий динамику раскрытия трещин по мере увеличения изгибающего момента. График представлен на рисунке 7.

Таблица 2 – Изменение параметров трещинообразования опытных образцов

Серия испытаний	Маркировка образца	Этап нагружения $\frac{M_{эксп}}{M_{разр}}, \%$													
		20-40		40-60		60-80		80-100		100-120		120-140		>140	
		$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм	$a_{крс},$ мм	$l_{крс},$ мм
Б-1	Б-1-1	0,03- 0,05	101	0,08- 0,11	71	0,13- 0,2	63	0,19- 0,25	51	-	-	-	-	-	-
	Б-1-2	0,03- 0,04	103	0,08- 0,12	63	0,12- 0,18	63	0,2- 0,26	60	-	-	-	-	-	-
Б-2	Б-2-1	-	-	0,05- 0,08	98	0,08- 0,11	96	0,1- 0,13	96	0,13- 0,23	60	0,23- 0,3	55	-	-
	Б-2-2	-	-	0,03- 0,05	77	0,06- 0,09	77	0,1- 0,13	67	0,15- 0,2	66	0,23- 0,28	65	0,25- 0,32	54
Б-3	Б-3-1	0,03- 0,05 0,02- 0,03	98	0,08- 0,13 0,04- 0,1	86	0,06- 0,13	60	0,1- 0,14	50	0,13- 0,17	50	0,16- 0,22	43	-	-
	Б-3-2	0,03- 0,04 0,02- 0,03	100	0,07- 0,09 0,06- 0,08	67	0,12- 0,18 0,12- 0,15	67	0,12- 0,17	50	0,15- 0,23	50	-	-	-	-
Б-4	Б-4-1	0,03- 0,04	100	0,06- 0,09	75	0,09- 0,15	75	0,14- 0,19	66	0,16- 0,2	66	0,24- 0,25	48	-	-
	Б-4-2	0,02- 0,05	96	0,07- 0,09	72	0,09- 0,16	54	0,17- 0,18	54	0,19- 0,26	46	-	-	-	-

Примечание - для образцов серии Б-3 ширина раскрытия трещин в ходе предварительного нагружения без усиления приведена в числителе, в ходе нагружения после усиления - в знаменателе.

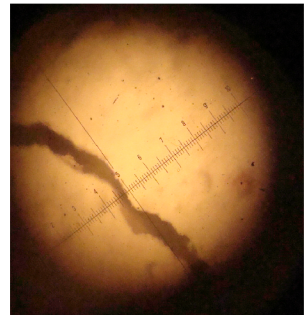
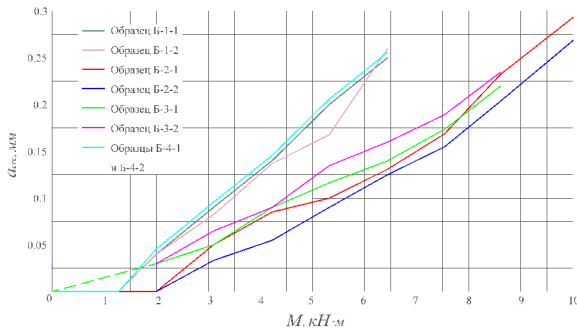


Рисунок 7. График зависимости ширины раскрытия нормальной трещины от изгибающего момента в сечении (слева) и определение ширины раскрытия трещин в процессе экспериментального исследования (справа)

Анализ рисунка 7 позволяет выявить точку излома диаграмм для образцов серий Б-2, Б-3, соответствующую значению изгибающего момента 7,5 кНм. При моменте, превышающем указанную величину, нарастание величины раскрытия трещин ускоряется на 15% для серии Б-2 и на 5% для серии Б-3.

Используя данные тензодатчиков, установленных на композитном элементе, были построены диаграммы распределения относительных деформаций композита по длине вдоль образца, приведенные на рисунке 8.

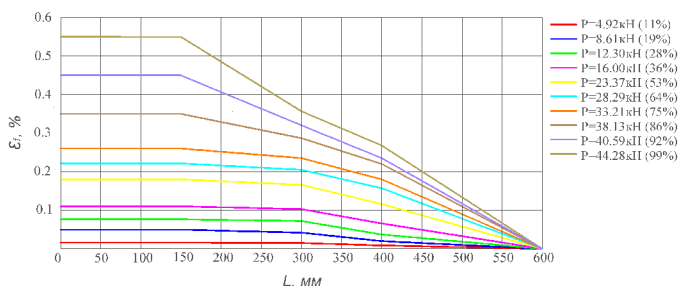


Рисунок 8. Диаграмма распределения относительных деформаций композита по длине анкеровки на образце Б-2-1

В ходе анализа результатов были сделаны следующие выводы:

1. Определена прочность и деформативность клеевого соединения. Подтверждены предположения об эффективной длине анкеровки внешнего армирования, о наличии сдвиговых деформаций между бетонной поверхностью и внешним армированием.

2. Разрушение усиленных элементов происходило вследствие нарушения совместной работы элементов усиления с бетоном элементов. При усилении ненагруженных элементов увеличение несущей способности составляет от 40% (без анкеров) до 63% (с анкерами). При усилении элементов, разгруженных после приложения нагрузки прирост несущей способности составляет 21-34%. При усилении элементов под нагрузкой прирост составляет 21-29%. Усиление изменяет расчетную схему элемента, которая начинает работать как балка с затяжкой.

3. Установлено, что усиление уменьшает деформативность изгибаемых элементов вследствие увеличения изгибной жесткости при нагрузках до 70% от разрушающих и вследствие изменения расчетной схемы элемента при нагрузках свыше 70% соответственно. Усиление ненагруженных образцов вызывает снижение прогибов на 30%, разгруженных после приложения нагрузки — на 10-11%, усиленных под нагрузкой — на 20-28%. При наличии воздействия на усиливаемый элемент нагрузки, величина которой превышает 70% от разрушающей, внешнее армирование практически не влияет на деформативность элемента.

4. Все образцы, кроме усиленных под нагрузкой показали уменьшение ширины раскрытия нормальных трещин во всем интервале нагрузок. Для ненагруженных элементов сокращение раскрытия трещин составило 100-118%, для разгруженных после приложения нагрузки – 36-54%. Момент трещинообразования ненагруженных балок повышается на 96%.

6. Наличие композитных анкерных устройств на торцах элементов повышает их несущую способность на 16,4% и позволяет реализовать рост несущей способности за счет изменения расчетной схемы элемента.

В третьей главе рассмотрены теоретические предпосылки определения элементов напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных с внешним армированием.

Рассмотрены характерные стадии работы элемента на всех этапах жизненного цикла для характерных вариантов усиления:

1. Усиление без предварительного нагружения. Практическая реализация ограничена и возможна при изменении проектных нагрузок до начала эксплуатации элемента;

2. Усиление после воздействия проектных нагрузок и последующего разгружения. Практическая реализация высока и возможна при проведении организационно-технологических мероприятий при условиях снятия с элемента всех внешних нагрузок;

3. Усиление под проектной нагрузкой. Наиболее распространенный вариант проведения работ по усилению, обладает высшим интересом со стороны исследователей.

Сделаны выводы о применимости следующих предпосылок и гипотез:

- в пределах высоты изгибаемого элемента составного сечения деформации бетона и арматуры изменяются линейно, справедлива гипотеза плоских сечений с учетом возможной деформации;

- гипотеза о малости и сложении относительных и абсолютных деформаций;

- гипотеза о взаимонезависимости частных деформаций;

- линейная связь напряжений и деформаций арматуры;

- нелинейная связь напряжений и деформаций бетона;

гипотеза о деструктивной природе силовых повреждений бетона;

сдвигающие усилия и жесткость шва контакта оказывают влияние на деформирование бетона усиленного изгибаемого элемента;

использование обобщенной физической модели, включающей уравнение равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении, деформирования нормального сечения, диаграммы состояния бетона;

- изогнутая ось рассматриваемого элемента принимается в виде синусоиды.

Получены математические выражения главного момента для различных вариантов усиления при условно жестком шве контакта:

$$M = \frac{bh}{12} \left\{ \left(\sigma_{b,20} + \sigma_{b,21} \right) \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{12} \right) + \left(\sigma_{b,21} + \sigma_{bt,22} \right) \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{9} \right) + \left(\sigma_{b,10} + \sigma_{b,11} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{8} \right) + \sigma_{b,11} \left[\frac{3\varepsilon_{b,10} - \varepsilon_{bt,14}}{\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}} \right] \left[\frac{h}{2} - \frac{h}{18} \left(\frac{3\varepsilon_{b,10} - \varepsilon_{bt,14}}{\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}} \right) \right] \right\} + \\ + A_s \cdot E_s \left[\varepsilon_{b,10} - \frac{3a_s}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \left(\frac{h}{2} - a_s - \frac{h}{3} \right) + A_{s'} \cdot E_s \left[2\varepsilon_{bt,14} - \frac{3a_{s'}}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \cdot \\ \cdot \left(\frac{h}{2} - a_{s'} \right) + A_f E_f \left[\varepsilon_{b,10} - \frac{t_f}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)$$

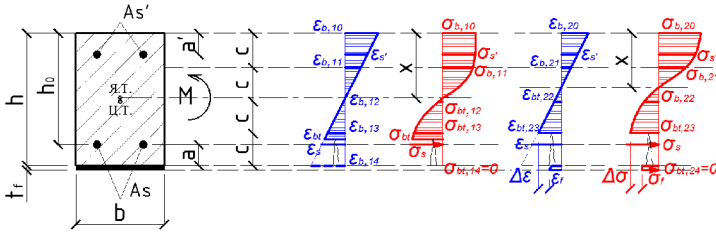


Рисунок 9. Напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента после усиления при 3-ем варианте усиления

Получены математические выражения главного момента и сдвигающей силы для различных вариантов усиления при условно податливом шве контакта:

$$M = \frac{bh}{6} \left\{ \left(\frac{\sigma_{b,20} + \sigma_{b,21}}{2} \right) \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{12} \right) + \frac{\sigma_{b,21}}{2} \left(\frac{\varepsilon_{2b,0} - \varepsilon_{bt,22}}{\varepsilon_{b,20} + \varepsilon_{bt,22}} \right) \left[\frac{h}{2} - \frac{h}{9} \left(\frac{2\varepsilon_{b,20} + \varepsilon_{bt,22}}{\varepsilon_{b,20} + \varepsilon_{bt,22}} \right) \right] \right\} + \\ + \left\{ \sigma_{b,10} \left(\frac{2\varepsilon_{b,10}}{\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}} \right) \left[\frac{h}{2} - \frac{h}{9} \left(\frac{5\varepsilon_{b,10} + 3\varepsilon_{bt,14}}{\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}} \right) \right] \right\} + \\ + A_s E_s \left[\varepsilon_{b,10} - \frac{3a_s}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{3} + a_s \right) + A_{s'} E_s \left[2\varepsilon_{bt,14} - \frac{3a_{s'}}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \left(\frac{h}{2} + a_{s'} \right) + \\ + A_f E_f \left[\varepsilon_{b,10} - \frac{t_f}{2h} (\varepsilon_{b,10} + \varepsilon_{bt,14}) \right] \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) \\ T = \frac{bh}{12} \left[\sigma_{b,20} + \sigma_{b,21} \left(\frac{2\varepsilon_{b,20}}{\varepsilon_{b,20} + \varepsilon_{bt,23} + \Delta\varepsilon'} \right) \right]$$

Используя данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, были определены характерные точки излома «реальной» диаграммы. Было установлено, что работа клевого соединения на сдвиг носит близкий к упругому характер вплоть до достижения предельных величин касательных напряжений, после чего зависимость приобретает ниспадающую ветвь. На рисунке 10 изображена зависимость $\tau - \varepsilon$ для клевого соединения, определенная по экспериментальным данным.

Обобщая результаты испытаний авторов с результатами экспериментальных исследований была получена обобщенную формулу определения предельных касательных напряжений в зоне контакта:

$$\tau_{u,ult} = 2,7 \cdot R_b^{0.3}$$

Определена величина предельных относительных деформаций композита, при которой начинается процесс отслоения внешнего армирования от поверхности бетона практически не зависит от класса бетона и продольной жесткости композита:

$$\varepsilon_{u,ult} = 0,0028 \div 0,003$$

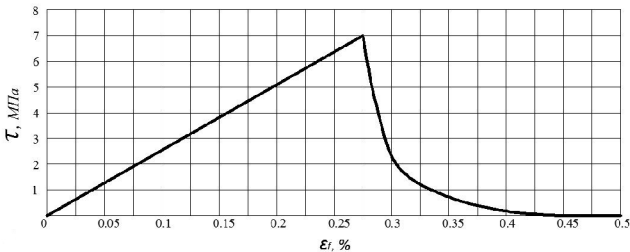


Рисунок 10. Предлагаемая автором зависимость $\tau - \varepsilon$ в контактном шве «композит-бетон» для бетона класса В20 и $n \cdot t_f \cdot E_f = 39300 H / мм$

По результатам были сделаны следующие выводы по главе 3:

1. Выявлены общие закономерности изменения напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов.
2. Сформулированы исходные предпосылки и основные гипотезы по расчету железобетонных элементов с учетом податливости шва сдвига.
3. Обоснован выбор теории проектирования реконструированного железобетона, учитывающей работу в составе единой конструкции материалов с отличающимися прочностными и деформативными свойствами, наличия исходного напряженно-деформированного состояния в усиливаемом элементе.
4. Разработан алгоритм расчета и оценки напряженно-деформированного состояния усиленных под нагрузкой железобетонных элементов при изгибе и проектирования усиления методом внешнего армирования с учетом специфики работы реконструированного железобетона.
5. Получены разрешающие уравнения напряженно-деформированного состояния усиленных изгибаемых железобетонных элементов с учетом жесткого и податливого шва в зоне контакта бетона с элементом усиления. Предложена методика расчёта прочности и деформативности изгибаемых усиленных элементов с возможностью задания закона деформирования зоны контакта и получением уравнений предельных напряжений в шве.

В четвертой главе представлены исходные данные и результаты численного исследования усиленных внешним армированием изгибаемых железобетонных элементов, а также сопоставлены полученные теоретические выводы с результатами экспериментальных и численных исследований.

Для моделирования работы изгибаемых железобетонных элементов был проведен численный эксперимент в программе конечно-элементного моделирования и анализа *ANSYS 18.2 (Workbench Static Structural)*. Бетон моделировался КЭ типа *SOLID65*. Работа бетона описывается моделью Вилльяма-Варнке. В качестве модели деформирования принята пятилинейная диаграмма состояния. Продольная и поперечная рабочая стальная арматура моделировалась стержневыми КЭ *LINK180*. В качестве модели деформирования принята двухлинейная диаграмма Прандтля. Композитный материал усиления моделировался оболочечными КЭ *SHELL181*. В качестве модели деформирования принята однолинейная диаграмма состояния.

В качестве параметра вариации был принят характер взаимодействия поверхностей бетона и внешнего армирования; были приняты для эксперимента следующие типы:

1. Жесткое сцепление без сепарации перемещений;
2. Моделирование КЭ типа *CONTA173* и *TARGE170*, позволяющими задать законы взаимодействия поверхностей. В качестве модели деформирования принята мультилинейная диаграмма, описанная в главе 3 и приведенная на рисунке 10;
3. Фрикционное соединение с переменным коэффициентом трения.

В результате численного эксперимента получены изополя главных напряжений, деформаций, перемещений в усиливаемого элемента и элементах усиления (см. рисунки 11-12), графические диаграммы, показывающие различия в подходах к заданию исходных данных исследования (см. рисунок 13).

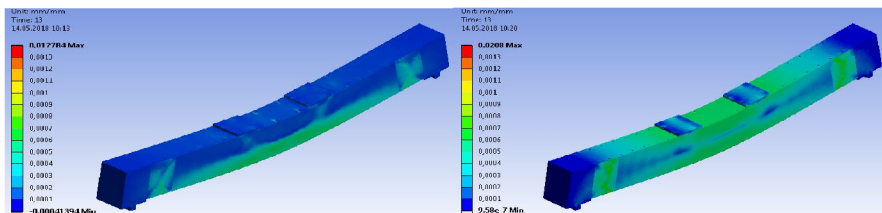


Рисунок 11. Изополя относительных деформаций (слева) и эквивалентных деформаций (справа) образца Б-2-2 при разрушающей нагрузке

В процессе проведения экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния усиленных изгибаемых железобетонных элементов сравнивали следующие параметры: прогибы в середине пролета, несущую способность на действие изгибающего момента, относительные деформации бетона и композитного материала,

напряжения в арматуре и композитном материале, напряжения сдвига в контактной зоне.

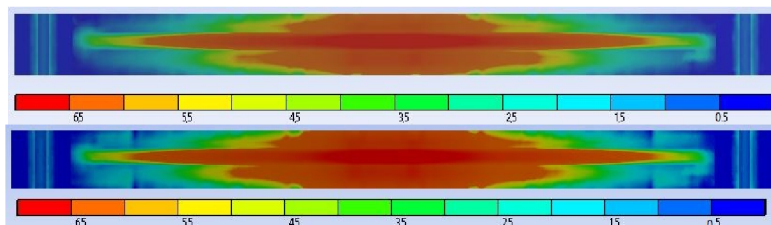


Рисунок 12. Изополя сдвигающих напряжений в клеевом соединении образца Б-2-1 (сверху) и образца Б-2-2 (снизу)

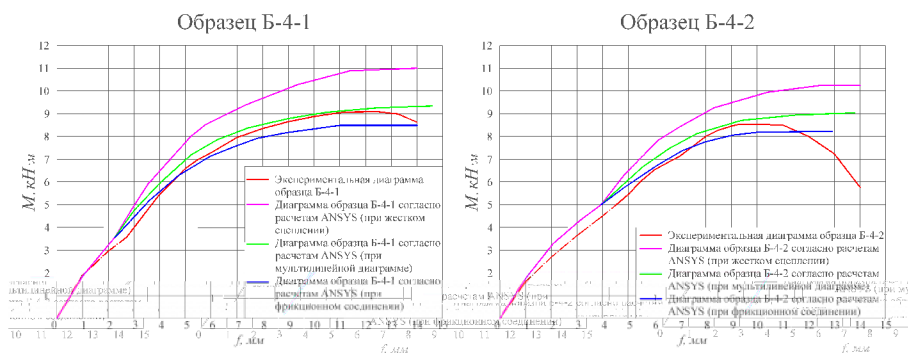


Рисунок 13. Диаграммы "М- f " при различных типах взаимодействия бетона и внешнего армирования по результатам численных исследований

Сопоставление расчетных и опытных значений по несущей способности и жесткости усиленных элементов приведены в таблице 3.

В результате исследований установлено, что на несущую способность усиленных изгибаемых железобетонных элементов влияют следующие факторы:

- податливость шва контакта, т.е. погонный модуль сдвига клеевого шва;
- предыстория нагружения усиливаемого элемента;
- прочностные и деформационные характеристики внешнего армирования;
- распределение напряжений и деформаций по расчетному сечению усиленного элемента, скорость их изменения при увеличении нагрузки;

Несущая способность усиленных изгибаемых железобетонных элементов увеличивается:

- при уменьшении податливости шва контакта;
- при уменьшении уровня нагрузки в процессе эксплуатации усиливаемого элемента в момент усиления;
- при уменьшении количества и ширины раскрытия нормальных трещин;

Таблица 3 – Изменение результатов численного исследования при использовании различных расчетных методик по сравнению с экспериментальными полученными результатами

Маркировка образца	Расчетная методика					
	По СП164.1325800.2014	По выводам главы №3 (жесткое соединение)	По выводам главы №3 (податливое соединение)	ANSYS с жестким сцеплением	ANSYS с мультитлинейной диаграммой	ANSYS с фрикционным соединением
Предельный изгибающий момент						
Б-2-1	+11,37%	+17,56%	+3%	+19,76%	0%	-6,2%
Б-2-2	-4,2%	+1,3%	-12,7%	+3,18%	-1%	-16,3%
Б-3-1	+17,1%	+17,6%	-3,6%	+17,5%	+1,05%	-6,6%
Б-3-2	+23,5%	+27,2%	+2,08%	+21,58%	+7,9%	-1%
Б-4-1	+21,3%	+19,67%	-2,31%	+19,56%	+1,19%	-7,12%
Б-4-2	+23,5%	+21,58%	-2,2%	+21,76%	+4,63%	-4,86%
Вертикальный прогиб в середине пролета						
Б-2-1	-29,25%	-27,22%	+1,5%	-30,75%	-1,8%	-1,8%
Б-2-2	-7,5%	-8%	+5,9%	-25%	-2,67%	-4,4%
Б-3-1	-18,2%	-18,5%	+13,3%	-26,58%	+5,35%	+12,3%
Б-3-2	-29,40%	-22,01%	+8,35%	-16,34%	+5,34%	+14,34%
Б-4-1	-12%	-9,5%	+3,2%	-18,35%	-5,06%	+2,2%
Б-4-2	-21,5%	-13,69%	-0,3%	-18%	-7,7%	+1,53%
Ширина раскрытия нормальной трещины						
Б-2-1	-14,8%	-	-	-24,93%	-3,08%	+1,8%
Б-2-2	-6,9%	-	-	-16,32%	+1,5%	+5,3%
Б-3-1	-8,01%	-	-	-6,27%	+4,6%	+10%
Б-3-2	-12,62%	-	-	-11,38%	+4,3%	+7,2%
Б-4-1	-24%	-	-	-20%	-3,6%	-1,46%
Б-4-2	-21,33%	-	-	-17,2%	+1,1%	-1,33%
«+» означает прирост показателя по сравнению с экспериментом						
«-» означает снижение показателя по сравнению с экспериментом						

Результаты численных исследований показали высокую сходимость с результатами натурального эксперимента. Наиболее точные данные были получены при моделировании зоны контакта «композит-бетон» с помощью конечных элементов целевых поверхностей с заданием закона взаимодействия, разработанного в главе 3. Применение методики жесткого сцепления дает завышенные значения прочности и жесткости элементов.

Величина завышения прочности на действие изгибающего момента составила 11,47% для серии Б-2, 19,54% для серии Б-3, 20,66% для серии Б-4. Завышение жесткости составило 27,87% для серии Б-2, 21,46% для серии Б-3 и 18,18% для серии Б-4. Величина ширины раскрытия трещин на всех стадиях трещинообразования меньше экспериментально полученной.

Применение методики податливого фрикционного соединения занижает экспериментально полученные данные: занижение прочности на действие изгибающего момента составило 11,85% для серии Б-2, 3,8% для серии Б-3 и 5,99% для серии Б-4, а жесткости – 11,27%, 13,32% и 1,86% соответственно.

По результатам главы 4 были сделаны следующие выводы:

1. Было проведено компьютерное моделирование работы под нагрузкой усиленных изгибаемых железобетонных элементов, построены на основании полученных данных графики деформирования вплоть до разрушения, получены изополя напряжений и деформаций бетона, арматуры и внешнего армирования в различных стадиях работы элемента;

2. Разработана методика численного моделирования наличия в элементах остаточных напряжений и деформаций (после снятия нагрузки), а также действующих напряжений и деформаций (при усилении под нагрузкой) перед введением в расчет внешнего армирования;

3. Проведены численные исследования по определению прочностных и деформативных свойств усиленных элементов при расчете по нескольким различным методикам, в т.ч. с применением программного комплекса, проведено сравнение полученных данных с экспериментальными исследованиями, сделаны выводы о сходимости и достоверности результатов.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе:

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований клеевого соединения «внешнее армирование – бетон» при работе на сдвиг. Разработан испытательный образец для проведения экспериментальных исследований. Получены экспериментальные данные о прочности и деформативности клеевого соединения, установлены особенности работы, подтвердившие принятые предпосылки расчета;

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием при усилении без предварительного нагружения, с предварительным нагружением, усилении под нагрузкой. Экспериментально установлены закономерности изменения параметров напряженно-деформированного состояния усиленных элементов. Получены экспериментальные данные о прочности, жесткости и трещиностойкости усиленных элементов с различными вариантами предварительного нагружения;

3. Разработана методика расчета параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием с учетом факторов реконструированного железобетона. Выполнены численные исследования усиленных элементов с применением различных методик и компьютерного моделирования. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с данными, полученными согласно предложенным методикам, показавшее эффективность предлагаемого аппарата;

4. Разработана методика и сформулированы предпосылки расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием с применением моделей деформирования железобетона, учитывающая разность характеристик материалов, предысторию нагружений, фактические прочностные и деформативные характеристики материалов, факторы действительной совместной работы.

Приложение А содержит акты о внедрении результатов диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- Публикации в издании, входящем в базу данных SCOPUS:

1. Merkulov, S.I. The use of woven composites for recovery building construction [Text] / S.I. Merkulov, **S.M. Esipov** // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. – 2019. – Issue 3 (381). – pp. 256-259. (0,46 п.л. / 0,23 п.л. автора)

2. Merkulov S.I. Modeling of the stress-strain state of a composite external strengthening of reinforced concrete bending elements [Text] / S.I. Merkulov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, **S.M. Esipov** // International science and technology conference on FarEastCon-2019, FarEastCon 2019, Vladivostok, Russky Island. – 2019. – p. 052044. (1,24 п.л. / 0,31 п.л. автора)

3. Merkulov, S.I. Modeling of stress-strain state of external reinforcement of single-span reinforced concrete beams [Text] / S.I. Merkulov, **S.M. Esipov** // 2019 International conference on civil, architectural and environmental sciences and technologies, CAEST 2019, Samara. – 2019. – p. 012133. (0,88 п.л. / 0,44 п.л. автора)

- Публикации в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ:

4. **Есипов, С.М.** Анализ методик проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами [Текст] / С.М. Есипов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 114-118. (0,49 п.л. / 0,49 п.л. автора)

5. Меркулов, С.И. Прочность и деформативность композитного материала на основе углеродной фибры при одноосном растяжении [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 11. – С. 69-73. (0,52 п.л. / 0,26 п.л. автора)

6. Меркулов, С.И. Влияние скорости и режима нагружения на прочность и жесткость армированных углепластиков [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 1. – С. 52-56. (0,49 п.л. / 0,25 п.л. автора)

7. Римшин, В.И. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом [Текст] / В.И. Римшин, С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 2 (35). – С. 93-100. (0,69 п.л. / 0,23 п.л. автора)

8. Меркулов, С.И. Увеличение несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций усилением внешним армированием композитным материалом [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 2 (1002). – С. 56-57. (0,23 п.л. / 0,12 п.л. автора)

- Публикации в других изданиях:

9. Меркулов, С.И. Экспериментальные исследования прочности и деформативности углеволоконного ламината при одноосном растяжении [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»: сборник статей Международных академических чтений. – Курск: КГУ, 2016. – С. 42-47. (0,32 п.л. / 0,16 п.л. автора)

10. Меркулов, С.И. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»: сборник статей Международных академических чтений. – Курск: КГУ, 2017. – С. 93-97. (0,26 п.л. / 0,13 п.л. автора)

11. **Есипов, С.М.** Критерии совместности работы композитного внешнего армирования и железобетонной конструкции при силовых воздействиях [Текст] / С.М. Есипов, Д.В. Есипова // Международный студенческий строительный форум-2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 64-69. (0,32 п.л. / 0,16 п.л. автора)

12. Меркулов, С.И. К вопросу моделирования усиления под нагрузкой ЖБК внешним армированием в ПК ANSYS [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»: сборник статей Международных академических чтений. – Курск: КГУ, 2018. – С. 59-62. (0,46 п.л. / 0,23 п.л. автора)

13. Меркулов, С.И. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, усиленных внешним армированием композитными материалами [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** // "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта. Под редакцией А.Г. Тамразяна. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2018. – С. 248-252. (0,26 п.л. / 0,13 п.л. автора)

14. Меркулов, С.И. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных балок, усиленных композитными материалами [Текст] / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов**, Д.В. Есипова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – № 3 (137). – С. 102-107. (0,5 п.л. / 0,17 п.л. автора)

- Патент на полезную модель:

15. Пат. RU 178353 Российская Федерация, СПК G01N 1/28; G01N 3/24. Испытательный образец для определения деформативности при сдвиге клеевого соединения армированного углеродными волокнами композитного материала с железобетоном / С.И. Меркулов, **С.М. Есипов** ; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2017143946 ; заявл. 14.12.2017 ; опубл. 30.03.2018, Бюл. № 10.

ЕСИПОВ Станислав Максимович

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНИМ КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2020 г. Формат 60х84 1/16
Объем 1,5 п.л. Заказ № _____ Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр.9.,
УПЦ ГИ РУТ (МИИТ)