

На правах рукописи

Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим

**Рациональные решения сталежелезобетонных балок, подверженных кручению,
применительно к условиям Республики Ирак**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

- Научный руководитель: **Абу Махади Мохаммед Ибрагим**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
- Официальные оппоненты: **Берлинов Михаил Васильевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Института промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Мелешко Владимир Аркадьевич
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики строительного факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»
- Ведущая организация: **АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва**

Защита состоится «20» ноября 2026 г. на заседании диссертационного совета ПДС 2022.015, созданного на базе ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 368.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре (Научной библиотеке) РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Электронная версия диссертации, автореферат и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>) и на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «17» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.015
кандидат технических наук

Виноградова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железобетонные конструкции, работающие на кручение, в течение всего срока эксплуатации могут накапливать повреждения и подвергаться дефектообразованию. Причинами этого могут служить увеличение против проектной нагрузки на сооружение, изменение в процессе эксплуатации его расчетной схемы, импульсные воздействия (удар или взрыв), сейсмические нагрузки, старение бетона. В настоящее время усиление поврежденных железобетонных конструкций, работающих на кручение, обычно выполняется внешними методами, что в условиях непрерывных эксплуатационных воздействий, не является эффективным. Таким образом, разработка рациональных типов сталежелезобетонных балок из самоуплотняющегося бетона с внутренними усиливающими стальными элементами и предварительно напряженной стержневой арматурой, подверженных крутильным нагрузкам, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Влияние крутильных нагрузок в железобетонных конструкциях на протяжении многих лет считалось второстепенным и в должной мере не учитывалось при проектировании. Обычно влияние кручения включалось в общий коэффициент запаса прочности сооружения, что приводило к консервативным оценкам его несущей способности. С учетом того, что современные численные методы расчета сооружений на прочность (метод конечных элементов, метод граничных элементов) позволяют получить рациональные решения основных конструктивных элементов, прочность которых на кручение во многих случаях может быть повышена в результате применения эффективного объемного армирования (усиления) наиболее напряженных участков конструкции. Кроме того, существуют отдельные типы конструкций, для которых кручение является основным видом напряженного-деформированного состояния.

Исследованием железобетонных элементов, подверженных кручению, занимались как зарубежные, так и российские ученые. Например, Гобара (Ghobarah), Панчачарам (Panchacharam), Беларби (Belarbi), Халиорис (Chalioris), Дейфалла (Deifalla), Гобара (Ghobarah), Дахель (Dakhel), Бан (Ban) (Aziz, Hashim) и др.

Стоит отметить исследования Карпенко Н.И., Травуша В.И., Колчунова В.И., Каприелова С.С., Демьянова А.И., Конорева А.В., которые были направлены на изучение параметров, влияющих на работу железобетонных балок сплошного и полого сечения при кручении.

Тем не менее, обзор современных публикаций, посвященных проблемам усиления и совершенствования конструкций железобетонных балок под действием крутильным нагрузкам, имеется крайне ограниченное количество.

Более того, зачастую крайне сложно выполнить внешнее усиление по всем сторонам коробчатых пролетных строений мостов. Вдобавок, оно может быть сопряжено с рисками при проведении работ по усилению высоко расположенных пролетных строений мостов. Кроме того, внешнее усиление может быть экономически нецелесообразным. В связи с этим возрастает интерес к разработке новых решений железобетонных балок, эффективно работающих на кручение.

Целью диссертационной работы является разработка рациональных типов сталежелезобетонных балок, подверженных кручению, для строительного комплекса республики Ирак.

Задачи исследования

1. В результате экспериментальных исследований установить эффективность использования внутренних каркасных стальных ребер жесткости для усиления железобетонных коробчатых балок в условиях чистого кручения.
2. Исследовать влияние количества и типа каркасных стальных ребер жесткости на сопротивление крутильным нагрузкам.
3. Исследовать влияние предварительного напряжения при наличии внутреннего усиления на работу железобетонных балок на кручение.
4. Предложить теоретическую зависимость для определения несущей способности предварительно напряженных сталежелезобетонных балок в зависимости от прочности бетона на сжатие, количества и типа стальных ребер жесткости, величины предварительного напряжения арматуры.
5. Выполнить нелинейный расчет в программе ABAQUS рассматриваемых железобетонных балок, усиленных стальными ребрами жесткости, с учетом упругопластического деформирования и накопления повреждений на крутильную нагрузку. Сравнить полученные экспериментальные данные с результатами расчета исследуемой железобетонной балки в программе ABAQUS.
6. Представить предложения и рекомендации, которые могут быть положены в основу дальнейших исследований.

Объектом исследования являются рациональные решения коробчатых железобетонных балок из самоуплотняющегося бетона, усиленные каркасными стальными ребрами жесткости двух типов.

Предметом исследования являются прочностные и деформационные характеристики коробчатых железобетонных балок, работающих на кручение.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен способ повышения прочности железобетонных балок из самоуплотняющегося бетона, работающих на кручение, в результате использования объемного армирования стальными ребрами жесткости. Данный способ усиления может применяться как с обычной стержневой, так и с предварительно напряженной арматурой; эффективен как для сборных коробчатых балок, используемых в мостостроении республики Ирак, так и в существующих конструкциях в качестве метода внешнего усиления при наличии процесса разрушения.
2. Для исследуемых балок в условиях чистого кручения экспериментальным путем были получены нагрузка трещинообразования, разрушающая нагрузка, деформации в бетоне и стальной арматуре (как продольной, так и поперечной), деформации в стальных ребрах жесткости. Определен угол закручивания на обоих концах балки, в четвертях и середине пролета. Установлены характер разрушения и картина трещинообразования.
3. Проведена верификация нелинейной модели деформирования с учетом повреждений (CDP) применительно к расчету железобетонных балок из самоуплотняющегося бетона, усиленных стальными ребрами жесткости, на крутильную нагрузку.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в получении научно-обоснованных результатов и выводов, касающихся работы ненапряженных и предварительно напряженных железобетонных балок из самоуплотняющегося бетона, усиленных внутренними поперечными стальными ребрами жесткости, в условиях чистого кручения.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых в области расчета и проектирования железобетонных конструкций, строительной механики, вычислительной математики. Использованы общенаучные методы исследования такие, как анализ, систематизация, математическое моделирование, физический эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика и результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик железобетонных коробчатых балок, усиленных

- внутренними поперечными стальными ребрами жесткости, подверженных чистому кручению;
2. Зависимости внешнего крутящего момента от угла закручивания, продольного удлинения, относительной деформаций бетона и арматуры, деформации стальных ребер жесткости;
 3. Влияние типа стальных ребер жесткости на увеличение несущей способности элемента при кручении;
 4. Влияние предварительного напряжения арматуры на увеличение прочности железобетонных балок, усиленных стальными ребрами жесткости разных типов;
 5. Результаты физически нелинейного конечно-элементного расчета с учетом пластического деформирования и трещинообразования исследуемых железобетонных балок, усиленных стальными ребрами жесткости; сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Степень достоверности результатов обеспечивается корректным использованием общепринятых положений теории железобетона, методов строительной механики, механики деформируемого твердого тела; применением методов испытаний, приведенных в действующих нормативных документах, использованием аттестованного испытательного оборудования и необходимым количеством проведенных экспериментов для обеспечения надежности полученных результатов.

Личный вклад автора. Вклад автора заключается в постановке и реализации задач диссертационной работы, анализе литературных данных, выборе методики исследования, в подготовке программы экспериментальных испытаний, проведении и получении результатов исследования, обработке и анализе данных проведенных численных расчетов и экспериментальных исследований, и оформлении материалов публикаций.

Соответствие диссертации научной специальности:

Работа по своему содержанию, предмету и методам исследования соответствует специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения и следующим пунктам Паспорта специальности: п. 1 «Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений»; п. 3 «Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности»; п. 8 «Разработка новых и совершенствование рациональных

типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности».

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях: 6th International Conference on Engineering Technology and its Applications (ICETA) 15-16 July 2023; XIII International Scientific and Practical Forum «Environmental Aspects of Sustainability of Construction and Management of Urban Real Estate»; «Identifying the Causes of the Knowledge Gap in Digital Technology in the Iraqi Construction Industry» ESCM-2024, 4th International Conference on Advance of Sustainable Engineering and its Application ICASEA-2023, Wasit University, Iraq.

Публикации. Материалы диссертации изложены в 9 научных публикациях, за последние пять лет, из них 5 статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень ВАК, 4 статьи в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы 141 страниц, включающий 75 рисунков и 39 таблиц. Количество источников использованной литературы – 194.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, указывается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводится анализ существующего состояния вопроса и обзор современных исследований, посвященных работе бетонных и железобетонных элементов, подверженных кручению. Отмечено, что усиление поврежденных железобетонных конструкций, работающих на кручение, обычно выполняется внешними методами, что в условиях непрерывной эксплуатации сооружения не всегда является эффективным. В республике Ирак в настоящее время получили широкое распространения железобетонные конструкции коробчатого сечения в пролетных строениях мостов, эстакадах автомагистралей, надземных переходах, сооружениях легкорельсового транспорта в связи с тем, что их крутильная жесткость и ядровое расстояние выше, чем в балках открытого или прямоугольного сечения. Такие конструкции являются более рациональными, обладают меньшим весом, повышенной местной устойчивостью стенки.

В своих исследованиях автор опирается, прежде всего, на зарубежный опыт строительства, расчета и проектирования железобетонных конструкций, а также на местные стандарты, действующие в республике Ирак.

Вторая глава является экспериментальной частью работы. Испытания образцов сталежелезобетонных балок на кручение были проведены автором в лаборатории строительных материалов кафедры гражданского строительства инженерного факультета Васитского университета под руководством профессора Аль-Гашам Таар Сауд Салман. В планировании и научно-техническом сопровождении экспериментов принимали участие доценты кафедры технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии Российского университета дружбы народов Абу Махади М.И. и Маркович А.С.

Для испытаний на кручение было подготовлено 14 образцов коробчатых балок из самоуплотняющегося бетона. Образцы были разделены на две категории, каждая из которых состояла из 7 образцов. Первая (без предварительного напряжения арматуры) и вторая категория (с предварительным напряжением арматуры) были подразделены на три группы. *Первая группа* состояла из одного контрольного образца без специального усиления. *Вторая группа* состояла из трех образцов, усиленных одним, тремя и пятью каркасными стальными ребрами жесткости с открытым профилем. *Третья группа* состояла из трех образцов, усиленных одним, тремя и пятью каркасными стальными ребрами жесткости с замкнутым профилем, соответственно. В таблице 1 представлены характеристики экспериментальных образцов.

Во время проведения испытаний фиксировались нагрузки трещинообразования, предельные нагрузки, характер разрушения образцов. На основании полученных данных были построены зависимости внешнего крутящего момента от угла закручивания, крутящего момента от деформации бетона, арматуры и стальных ребер жесткости.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных образцов

Группа	Обозначение образцов		Размеры (см)					Кол-во стальных каркасных ребер жесткости (шт.)	Тип каркасных стальных ребер жесткости
	Первая категория	Вторая категория	Длина (L)	Ширина (B)	Высота (H)	Толщина полки (t_f)	Толщина стенки (t_w)		
1	1NR	1PR	210	30	30	6	6	----	----
2	2N1OF	2P1OF						1	Открытое сечение
	3N3OF	3P3OF						3	
	4N5OF	4P5OF						5	
3	5N1CF	5P1CF						1	Закрытое сечение
	6N3CF	6P3CF						3	
	7N5CF	7P5CF						5	

Все образцы были армированы стержнями $\varnothing 12$ мм в верхней и нижней частях сечения в продольном направлении и замкнутыми хомутами ($\varnothing 8$ мм с шагом 130 мм) в поперечном.

Во время испытания внешний крутящий момент прикладывался к концам образца. На прочность образцов граничные условия влияния не оказывали, так как опоры обладали способностью свободно вращаться, с незначительным сопротивлением трения приложенному крутящему моменту. На рисунке 1 показаны геометрические характеристики образцов и особенности их армирования.

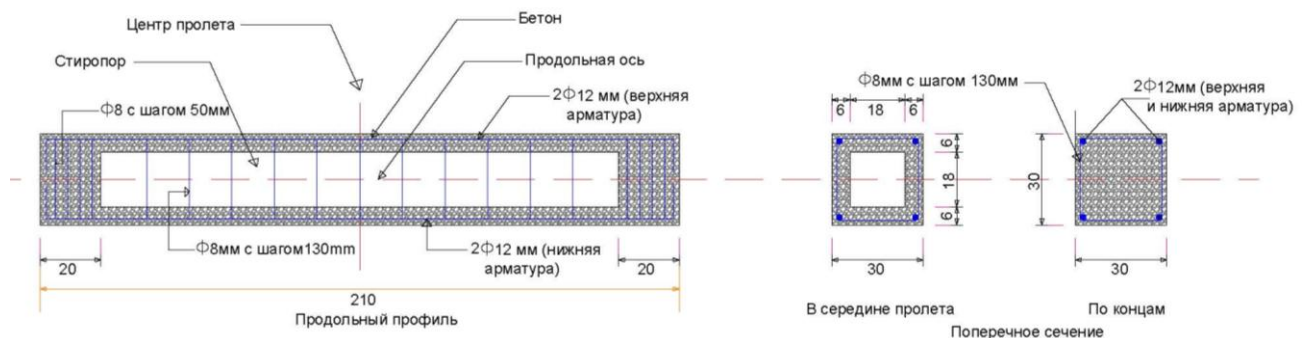


Рисунок 1 – Контрольные образцы (без усиления) 1NR и 1PR (размеры даны в см)

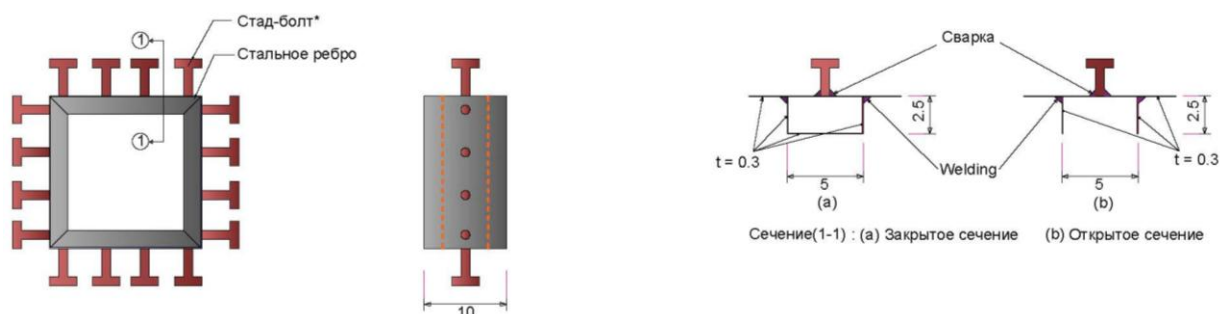


Рисунок 2 – Каркасные стальные ребра жесткости (размеры даны в см)

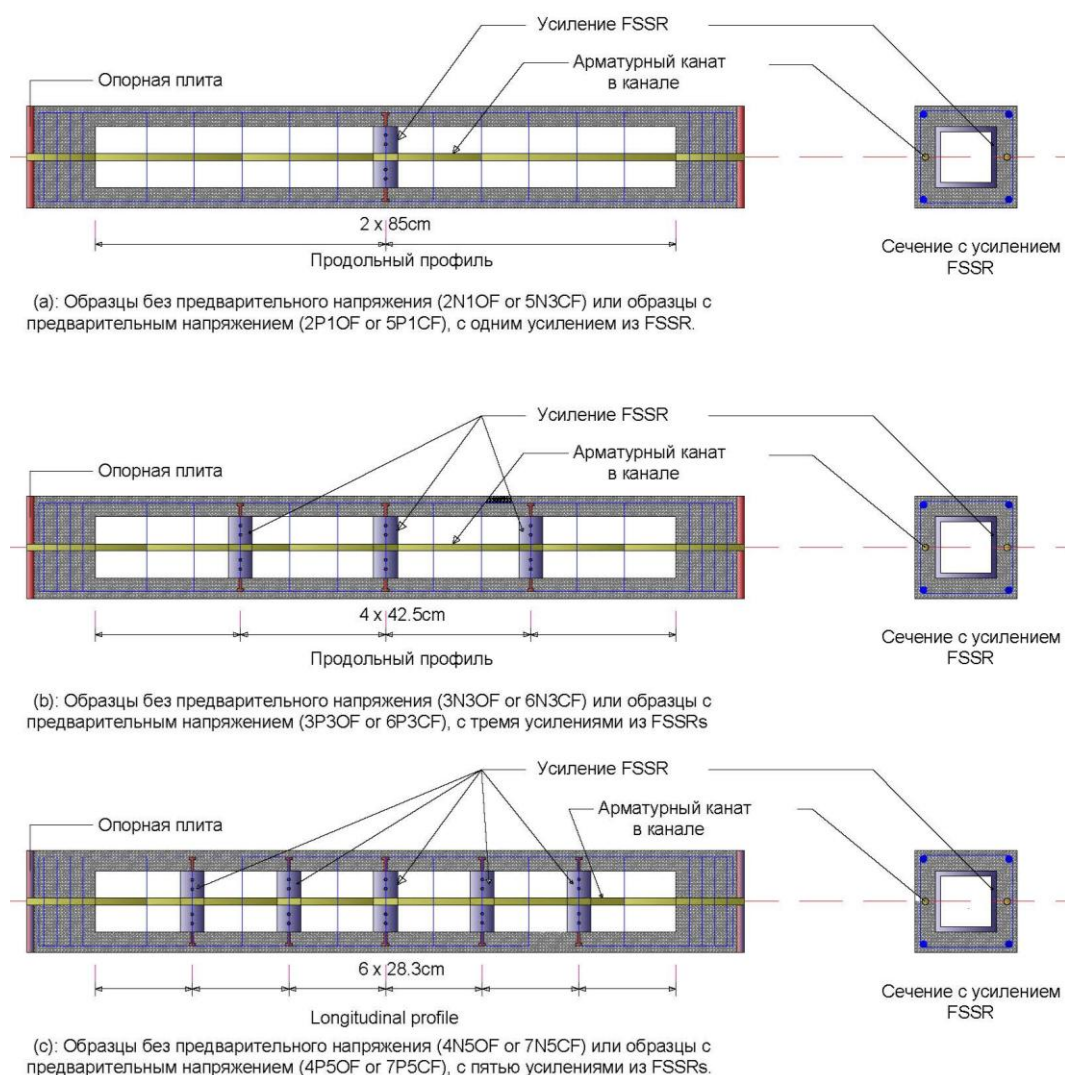


Рисунок 3 – Образцы 1 и 2 категории (размеры даны в см)

Для формирования пустот в экспериментальных образцах использовались пенополистирольные блоки (рисунок 4).



Рисунок 4 – Экспериментальные образцы до бетонирования

Для анализа напряженно-деформированного состояния образцов во время нагружения использовались тензорезисторы, наклеенные на бетон, поперечную, продольную арматуру и ребра жесткости. Для стальной арматуры и усиливающих ребер жесткости использовались тензорезисторы TML (FLA-5-11-3LJC), а для бетона – TML (PFL-30-11-3LJC). Для записи деформаций использовался регистратор данных DataTaker DT85. Местоположение тензорезисторов на образцах приведено на рисунке 5.

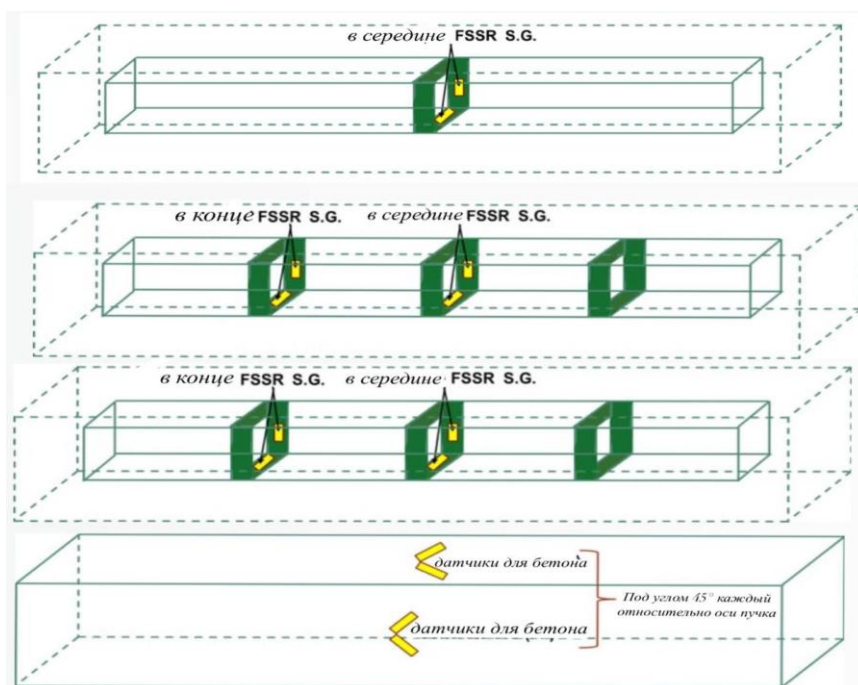


Рисунок 5 – Местоположение тензорезисторов на образцах

На рисунке 6, а показана экспериментальная установка.



Рисунок 6 – Экспериментальная установка (а) и контрольные образцы (б)

В программу экспериментальной части также входили контрольные испытания стандартных образцов в форме кубов, цилиндров и призм (рисунок 6, б), необходимых для определения физико-механических характеристик самоуплотняющегося бетона.

Обобщающие результаты испытаний контрольных образцов представлена в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний контрольных образцов из самоуплотняющегося бетона

Тип бетона	Прочность на сжатие (МПа)		f'_c/f_{cu} (%)	γ_c (кг/м ³)	f_r (МПа)	f_t (МПа)	E_c (МПа)	G_c (МПа)	ν_c
	f'_c	f_{cu}							
СУБ	56	57.3	97.7	2424	6.6	2.9	41555	28192	0.263

В третьей главе приведены результаты проведенных экспериментов. На ранних этапах нагружения образец вел себя упруго. При увеличении нагрузки появлялись трещины, имеющих наклонное очертание. Первая видимая трещина обычно образовывалась в сечении середины пролета или вблизи него. В дальнейшем, по мере увеличения крутящего момента количество трещин увеличивалось. После образования трещин они составляли определенный угол относительно продольной оси испытуемого образца-балки и циркулировали по периферии испытуемого образца, образуя трещину в виде спирали, простирающуюся между двумя его концами.

Отношение крутящего момента при образовании трещин T_{cr} к предельному крутящему моменту T_u составляло примерно от 57,2% для образца 1NR до 33,9% для образца 7N5CF для балок первой категории (ненапряженные образцы) и примерно от 61% для образца 1PR до 36,9% для образца 4P5OF для образцов второй категории (предварительно напряженные). Углы наклона трещин находились в диапазоне от 41° до 54° для образцов первой категории и от 35° до 47° для образцов второй категории. Образцы второй категории имели меньшее количество и ширину

трещин, чем трещины образцов первой категории. Это может быть объяснено влиянием предварительного напряжения образцов. Несущая способность на кручение образцов, усиленных стальными ребрами жесткости, оказалась выше, чем у контрольного образца. Для коробчатых балок разрушение происходит, когда бетон имеет многочисленные трещины, ограниченные между стальными ребрами жесткости. Однако, при этом наблюдалась постепенная деградация жесткости из-за увеличения угла закручивания и развития главной диагональной трещины. Распространение трещин по всей длине образцов в ходе испытаний дало качественное представление о механизмах разрушения. Первая видимая трещина во всех образцах возникала вблизи середины пролета на передней или верхней грани образца и постепенно увеличивалась. По мере увеличения внешнего крутящего момента трещины постепенно распространялись на все стороны и, наконец, приобретали спиралевидное очертание. На рисунках 7 и 8 показаны механизмы разрушения испытанных образцов первой и второй категории, соответственно.

Образцы второй категории (2P1OF, 3P3OF, 4P5OF, 5P1CF, 6P3CF, 7P5CF), а также контрольный образец (1PR) имели предварительное напряжение. Наличие предварительного напряжения привело к тому, что уменьшилась ширина раскрытия трещин по сравнению с образцами первой категории (без предварительного напряжения). При этом момент трещинообразования T_{cr} и предельный момент T_u увеличились и, как следствие, снизилось количество трещин. При этом разрушение предварительно напряженных образцов имело тенденцию к внезапной форме на заключительных стадиях нагружения. При разрушении наблюдалось скалывание защитного слоя бетона и выпучивание продольной арматуры, вызванной усилением предварительного напряжения, передаваемого на бетон.

На рисунках 7 и 8 показаны образцы 1 и 2 категорий после испытаний, объясняющие механизм разрушения.





Рисунок 7 – Механизм разрушения образцов без предварительного напряжения (1 категория)

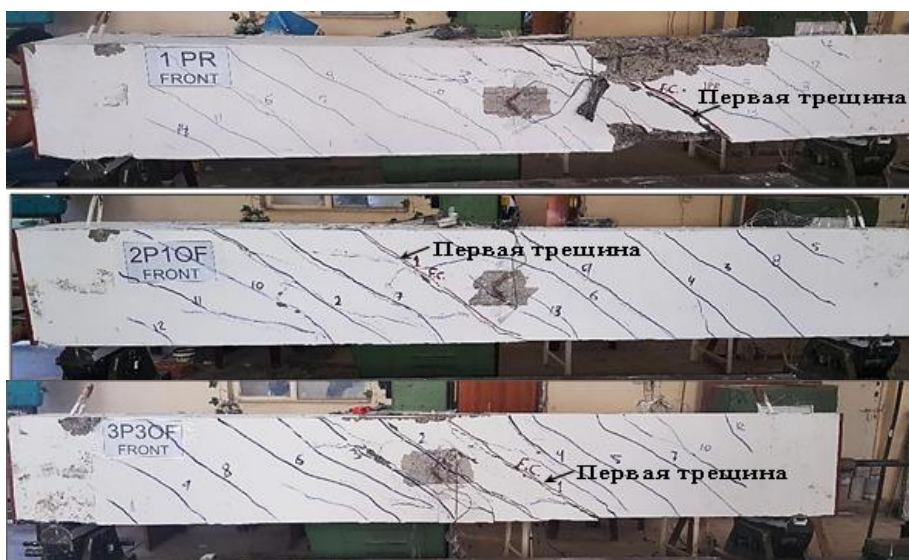




Рисунок 8 – Механизм разрушения предварительно напряженных образцов (2 категория)

Значения крутящего момента трещинообразования T_{cr} и предельного крутящего момента T_u , полученные по результатам испытаний образцов, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов

Категория	Маркировка образца	P_{cr} , кН	P_u , кН	A_{tm} , м	T_{cr} , кНм	T_u , кНм	Увеличение T_{cr} , %**	Увеличение T_u , %**	Увеличение T_{cr} , %***	Увеличение T_u , %***
Первая	1NR*	70.01	122.5	0.5	17.51	30.64	0.0	0.0	----	----
	2N1OF	92.52	162.5		23.14	40.64	32.12	32.71	----	----
	3N3OF	90.01	195.0		22.51	48.76	28.61	59.21	----	----
	4N5OF	90.02	237.5		22.51	59.39	28.6 3	93.93	----	----
	5N1CF	87.51	178.5		21.89	44.64	25.01	45.7 2	----	----
	6N3CF	90.01	215.0		22.51	53.76	28.61	75.5 1	----	----
	7N5CF	92.52	272.5		23.14	68.14	32.13	122.42	----	----
Вторая	1PR*	117.51	192.5	0.5	29.38	48.14	0.0	0.0	67.91	57.11
	2P1OF	122.51	242.5		30.63	60.64	4.3 2	26.02	75.01	98.0 1
	3P3OF	130.01	280.0		32.60	70.01	10.62	45.5 1	85.72	128.62
	4P5OF	127.52	345.0		31.90	86.26	8.53	79.22	82.13	181.63
	5P1CF	135.01	257.5		33.76	64.39	14.91	33.8 3	92.9 1	110.22
	6P3CF	162.51	302.0		40.63	75.51	38.32	56.91	132.12	146.51
	7P5CF	182.52	371.5		45.63	92.89	55.3 3	93.03	160.7 2	203.32

*Контрольные образцы категории.

Угол закручивания θ регистрировался на левом и правом концах, в четверти и середине пролета каждого образца. На рисунке 9 показана зависимость внешнего крутящего момента от угла закручивания на концах испытанных образцов.

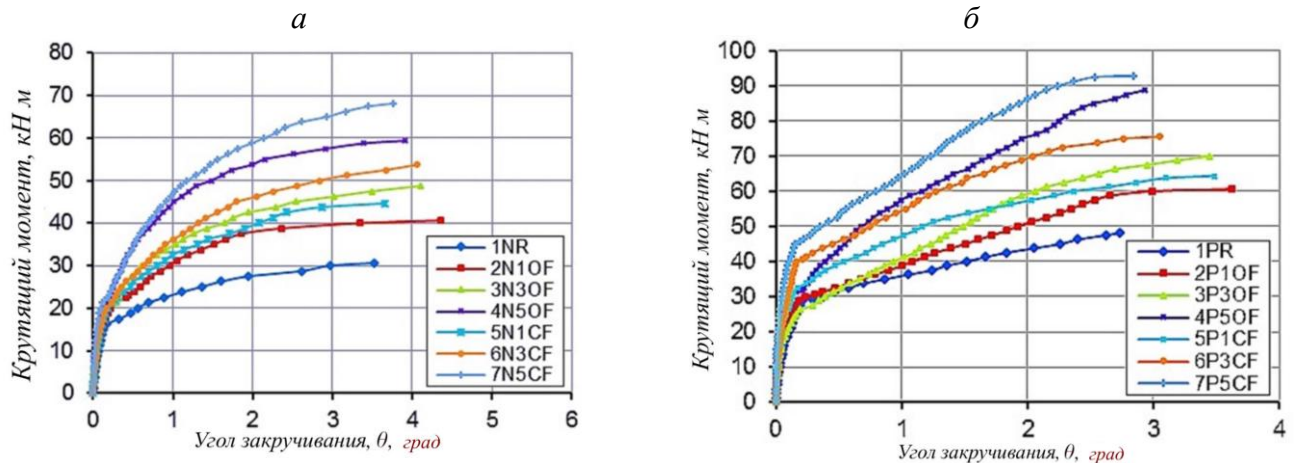


Рисунок 9 – Зависимость крутящего момента от угла закручивания на концах пролета для образцов без предварительного напряжения (а) и с предварительным напряжением (б)

Угол закручивания изменяется линейно с увеличением приложенной нагрузки до тех пор, пока крутящий момент не достигнет величины T_{cr} и нелинейно после этого. При $T = T_u$ угол закручивания уменьшается с увеличением количества стальных ребер жесткости. Следует отметить, что тип ребер жесткости (открытый или закрытый) не оказывает существенного влияния на предельное значение угла закручивания.

Продольное удлинение образцов δ изменяется линейно при низких значениях крутящего момента (в диапазоне от 7,5 до 12,5 кНм) в зависимости от количества и типа стальных ребер жесткости. В этом случае деформации имеют небольшие значения. При дальнейшем росте нагрузки величина удлинения уменьшается с увеличением количества усиливающих ребер по сравнению с контрольным образцом до достижения T_u (рисунок 10).

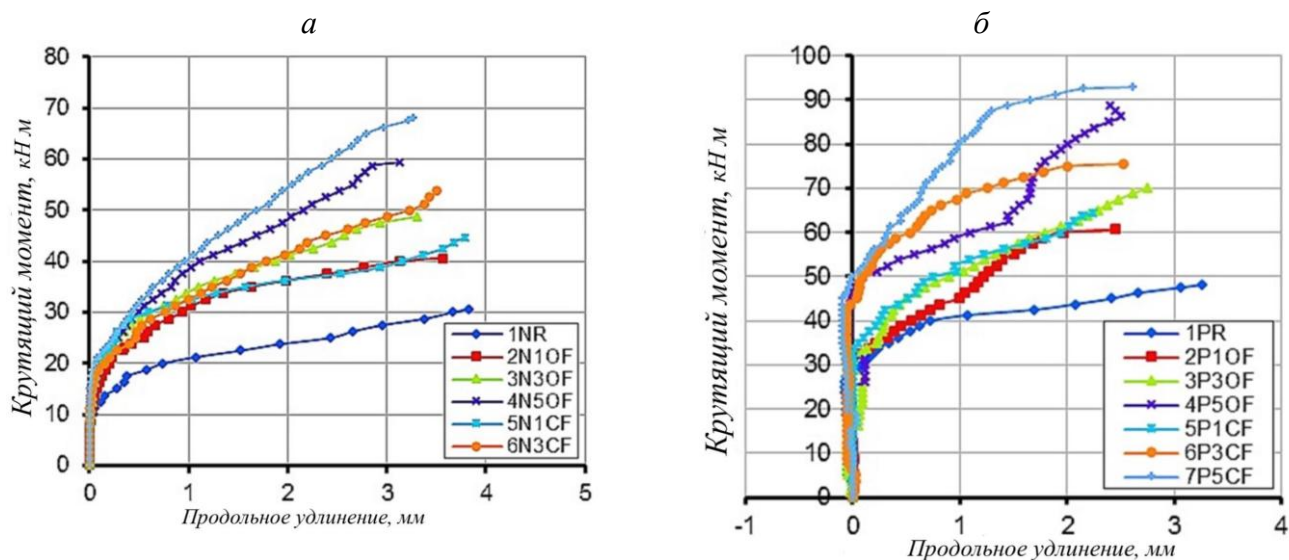


Рисунок 10 – Зависимость крутящего момента от продольного удлинения для образцов без предварительного напряжения (а) и с предварительным напряжением (б)

Сравнивая результаты испытаний образцов второй категории с результатами испытаний образцов первой категории, можно заключить, что предварительное напряжение оказывает существенное влияние на увеличение несущей способности, при этом уменьшает момент трещинообразования и деформации.

В результате модификации теории Мухопадхьяй и Роя предложена теоретическая зависимость для определения несущей способности предварительно напряженных сталежелезобетонных балок в зависимости от прочности бетона на сжатие f' , величины предварительного напряжения σ и коэффициента жесткости элементов усиления α_n , имеющая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными:

$$T = \sqrt{f'_c} \left[\sum_{n=0}^r \left(\alpha_n \left(\frac{b}{d} \right)^n \frac{b^3 d}{b_c} \right) \right] \sqrt{1 + \frac{10\sigma}{f'_c}}. \quad (1)$$

Кроме того, на основании регрессионного анализа получено много инвариантное уравнение для определения предельного крутящего момента рассматриваемого типа балок в зависимости от факторов, учитывающих влияние количества X_1 и типа X_2 стальных ребер жесткости, предварительного напряжения арматуры X_3 . В общем виде данное уравнение представляется следующим образом:

$$T_u = -1.7931 + 6.0689X_1 + 5.8984X_2 + 21.6957X_3. \quad (2)$$

Сравнение результатов, полученных по уравнению (2) с экспериментальными данными показано в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение результатов по уравнению (2) с экспериментальными данными

Марка образца	T_u по результатам экспериментов, кНм	Факторы			T_u по уравнению (2)	Расхождение, %
		X_1	X_2	X_3		
1NR*	30.64	0.5	1	1	28.83560112	5.9
2N1OF	40.64	1	2	1	37.76854831	7.0
3N3OF	48.76	3	2	1	49.90650402	2.4
4N5OF	59.39	5	2	1	62.04445972	4.5
5N1CF	44.64	1	3	1	43.66700657	2.2
6N3CF	53.76	3	3	1	55.80496228	3.8
7N5CF	68.14	5	3	1	67.94291798	0.3
1PR*	48.14	0.5	1	2	50.53131541	5
2P1OF	60.64	1	2	2	59.46426259	1.9
3P3OF	70.01	3	2	2	71.6022183	2.3
4P5OF	86.26	5	2	2	83.74017401	2.9
5P1CF	64.39	1	3	2	65.36272086	1.5
6P3CF	75.51	3	3	2	77.50067656	2.6
7P5CF	92.89	5	3	2	89.63863227	3.5

Четвертая глава посвящена использованию нелинейной модели упругопластического деформирования бетона с учетом накопления повреждений в сжатом и растянутом бетоне для моделирования работы исследуемых железобетонных балок, усиленных стальными ребрами жесткости. Для этих целей была использована программа ABAQUS, реализующая метод конечных элементов в форме метода перемещений.

Тело бетона, стальные ребра жесткости, катаны, торцевые пластины моделировалось объемными конечными элементами (C3D8R), стальная арматура – одномерными стержневыми элементами (T3D2). Для бетона принималась криволинейная диаграмма деформирования, полученная путем испытаний образцов на одноосное сжатие, из которой была выделена пластическая часть.

Для арматурной стали и ребер жесткости принимался идеальный упругопластический закон деформирования, которой соответствует диаграмме Прандтля.

Входные параметры модели CDP, определяющие трехосное напряженное состояние бетона, приведены в таблице 5.

Таблица 5. Входные параметры модели CDP

Модуль упругости E_0 , МПа	41555
Коэффициент Пуассона ν	0.2
Угол дилатации ψ , град	30
Эксцентриситет ϵ	0.1
f_{bo} / f_{co}	1.16
k_c	0.667
Вязкость μ	0.0005

В таблице 6 представлено сравнение разрушающего крутящего момента и угла закручивания, полученных в результате численных расчетов и экспериментальных данных для всех балок, подвергнутых испытанию на кручение.

Таблица 6. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований рассматриваемых балок

Марка образца	Предельный крутящий момент, T_u			Угол закручивания при предельном крутящем моменте, θ_u		
	EXP (кНм)	FE (кНм)	FE / EXP	EXP (град.)	FE (град.)	FE / EXP
1NR*	30.63	32.549	0.001418	3.538	3.461	0.000692
2N1OF	40.63	41.666	0.000002	4.358	4.231	0.001135
3N3OF	48.75	52.531	0.002763	4.102	3.997	0.000908
4N5OF	59.38	61.052	0.00001	3.908	3.939	0.00001
5N1CF	44.63	46.96	0.00074	3.656	3.296	0.010611
6N3CF	53.75	53.255	0.00116	4.054	3.756	0.006092
7N5CF	68.13	69.87	0.000003	3.761	4.019	0.004103
1PR*	48.13	48.1	0.00065	2.738	2.726	0.00008
2P1OF	60.63	59.1	0.00252	3.624	3.618	0.00004
3P3OF	70	69.7	0.00085	3.4597	3.482	0.000003
4P5OF	86.25	88.07	0.00001	2.948	3.0425	0.000757
5P1CF	64.38	64.89	0.000291	3.492	3.625	0.001125
6P3CF	75.5	76.99	0.00002	3.055	3.22	0.002447
7P5CF	92.88	99.27	0.001919	2.857	3.174	0.011324
Среднее значение			1.024	Среднее значение		1.004
Коэффициент вариации, %			3.012	Коэффициент вариации, %		5.475

Наблюдается хорошая корреляция между полученными значениями. Так, отношение T_{uFE} / T_{uExp} находится в диапазоне от 1,024 до 3,012% для предельных крутящих моментов, и $\theta_{uFE} / \theta_{uExp}$ от 1,004 до 5,475% для углов закручивания, соответственно.

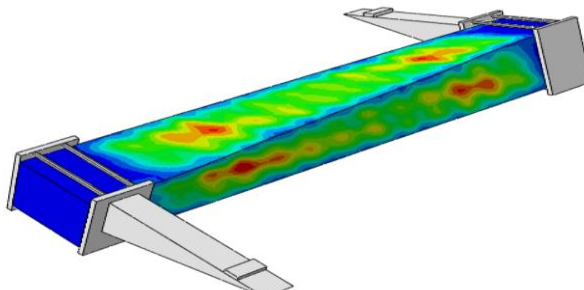
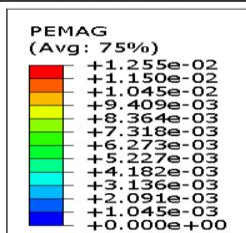
По результатам численных расчетов, в сравнении с экспериментальными образцами, балки имеют более высокий уровень крутильной жесткости.

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что, с одной стороны, в бетонной матрице имеется множество микротрещин, что связано с процессами усадки бетона при твердении. С другой стороны, в численных расчетах предполагается идеальное сцепление между бетоном, арматурой и ребрами жесткости. Таким образом, возникающий в реальных образцах эффект проскальзывания, приводящий к нарушению совместной работы бетона и армирующих элементов, не учитывается.

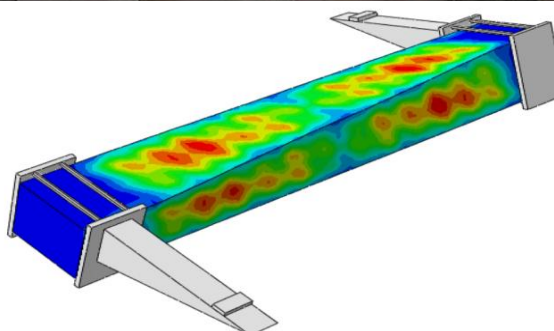
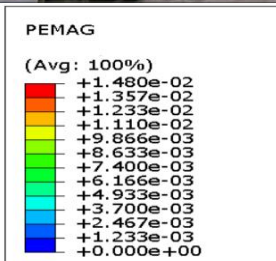
Согласно упругопластической модели бетона с повреждениями (CDP), трещины в железобетонных элементах образуются в областях, где главные растягивающие деформации превышают предельную деформацию бетона растяжению. То есть, полагается, что бетон растрескивается, когда пластическая деформация превышает нулевое значение. Таким образом, пластическая деформация использовалась как индикатор образования и развития трещин. При этом считается, что трещины образуются в направлении, ортогональном направлению пластической деформации.

На рисунках 11 и 12 показаны поля пластических деформаций, отвечающие предельной нагрузке, и схемы трещинообразования экспериментальных балок в предельной стадии. Из этих рисунков очевидно, что наблюдается хорошее совпадение картины разрушения между численными и экспериментальными результатами. Кроме того, для всех балок наблюдался характерный для кручения механизм разрушения из-за образования трещины, начинающейся на поверхности и распространяющейся к ядру балки, с формированием спиралевидной формы.

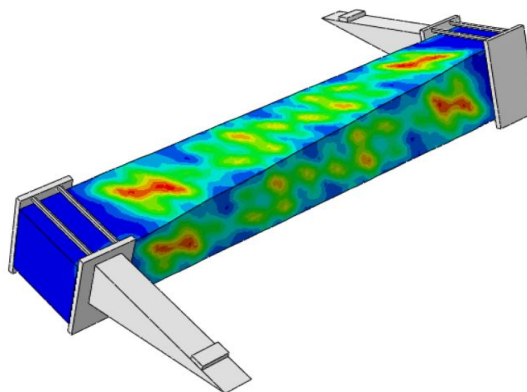
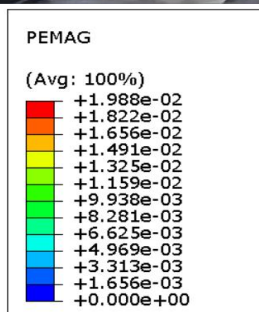
Образец марки 1NR



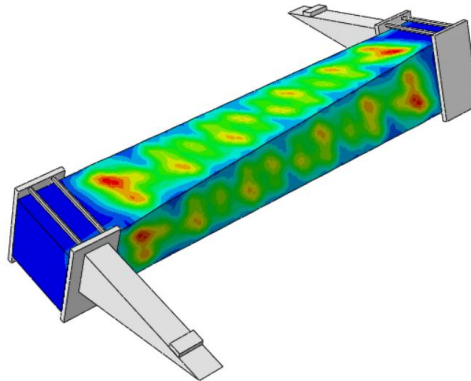
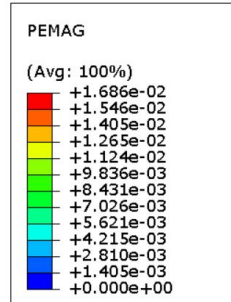
Образец марки 2N1OF



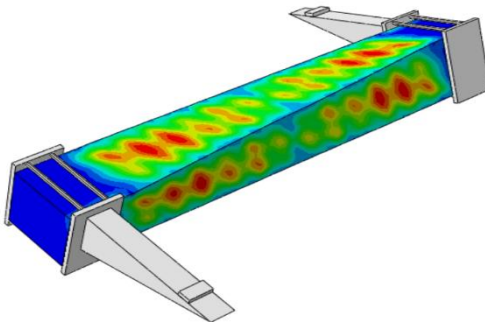
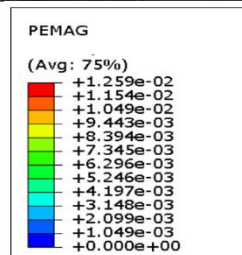
Образец марки 3N3OF



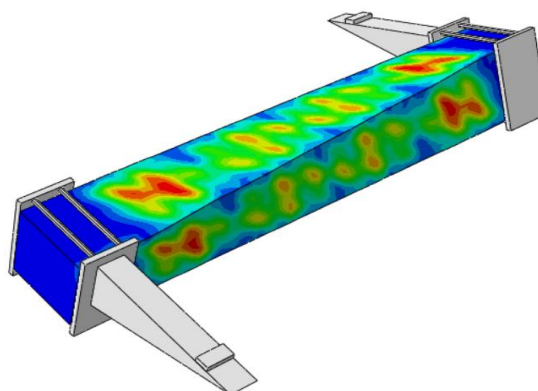
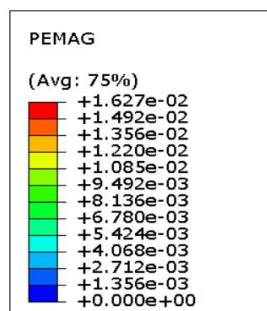
Образец марки 4N5OF



Образец марки 5N1CF



Образец марки 6N3CF



Образец марки 7N5CF

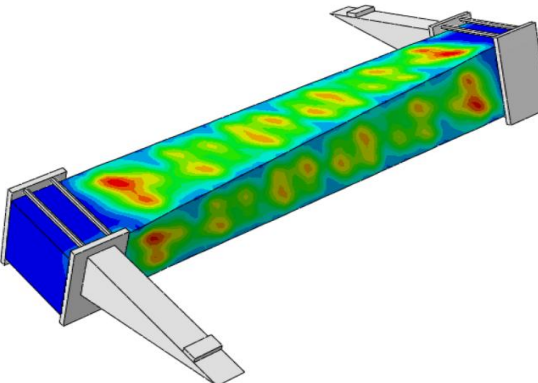
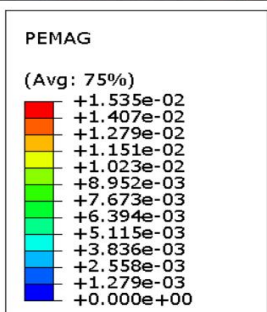
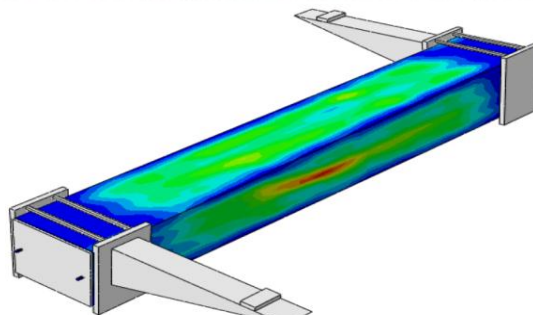
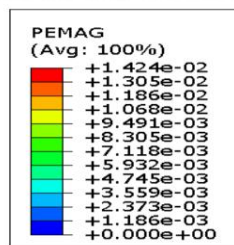
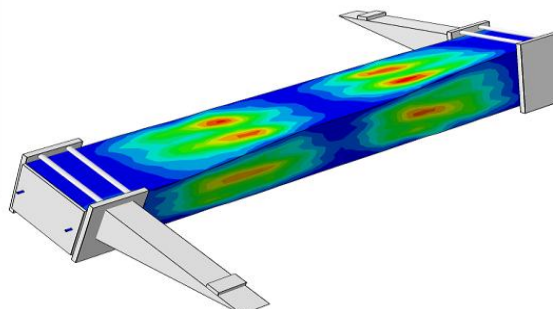
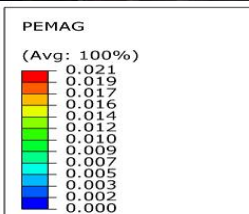


Рисунок 11 – Сравнение картины разрушения по результатам экспериментальных и численных исследований (образцы без предварительного напряжения)

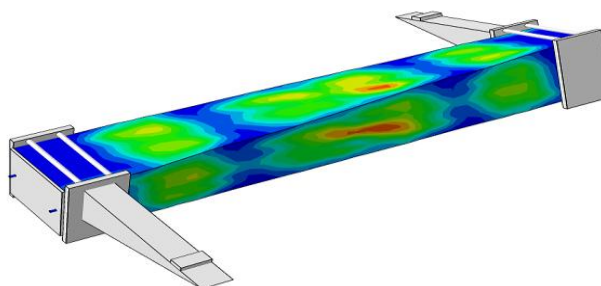
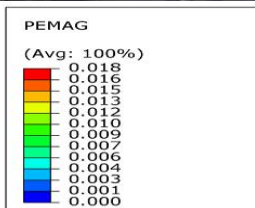
Образец марки 1PR



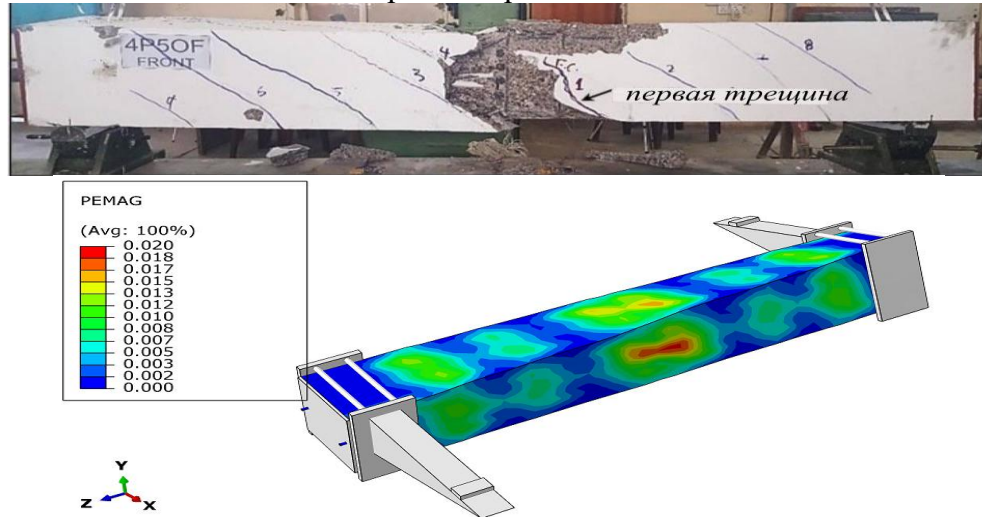
Образец марки 2P1OF



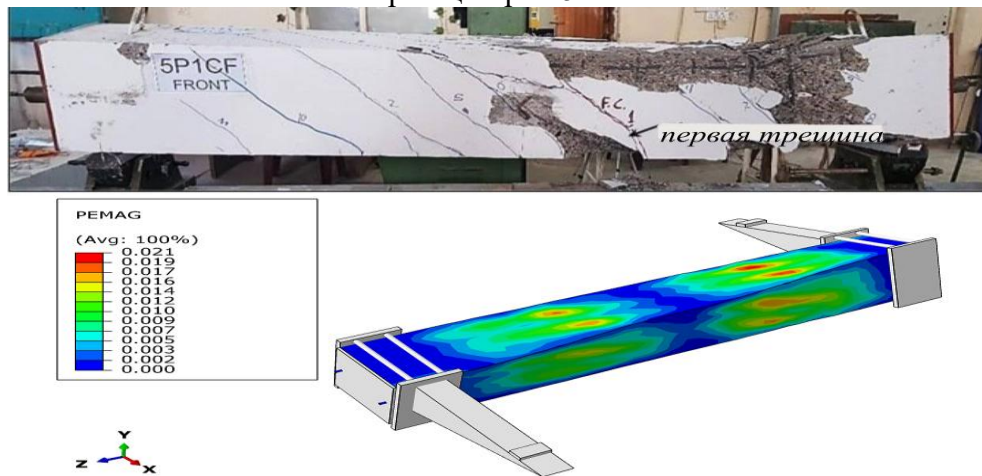
Образец марки 3P3OF



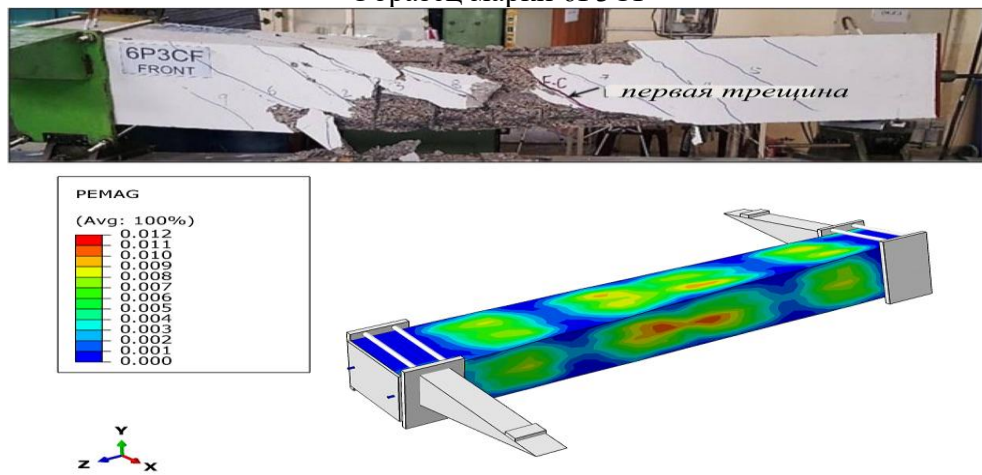
Образец марки 4P5OF



Образец марки 5P1CF



Образец марки 6P3CF



Образец марки 7P5CF

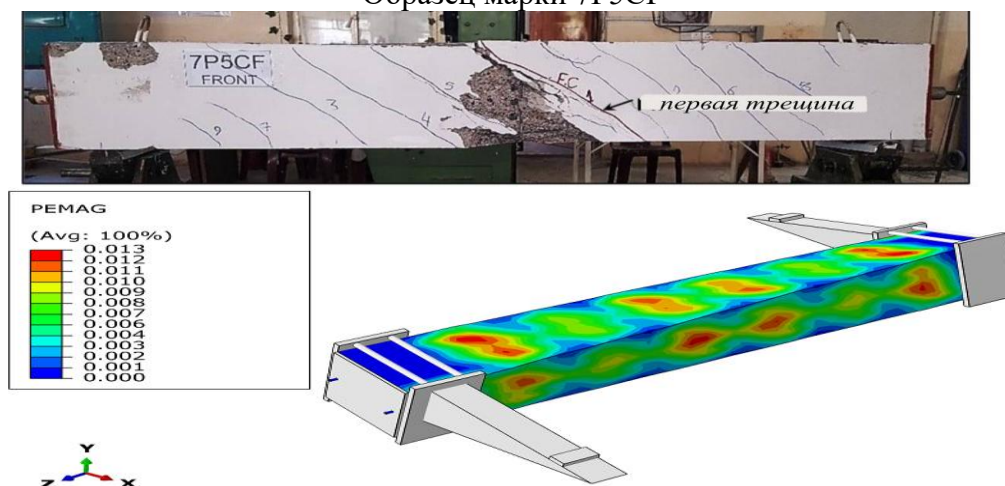


Рисунок 12 – Сравнение картины разрушения по результатам экспериментальных и численных исследований (образцы с предварительным напряжением)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования получены следующие основные выводы и результаты:

1. В результате экспериментальных исследований установлена эффективность использования внутренних каркасных стальных ребер жесткости для усиления железобетонных коробчатых балок в условиях чистого кручения. По сравнению с контрольными образцами нагрузка трещинообразования и предельная нагрузка увеличились, в среднем, на 29,17% и 71,56% в отсутствие предварительного напряжения бетона, и – на 21,99% и 52,72%, соответственно, при его наличии.
2. Установлено влияние количества и типа каркасных стальных ребер жесткости на крутильную жесткость балок. Повышение крутильной жесткости балок напрямую не связано с увеличением количества усиливающих внутренних элементов. Это может быть обусловлено тем, что сопротивление образцов до достижения нагрузки трещинообразования в основном зависит от вклада бетона. При этом предельная нагрузка увеличивается прямо пропорционально количеству усиливающих стальных ребер жесткости. Это может быть обусловлено тем, что несущая способность образца зависит от сопротивления бетона, арматуры и усиливающих элементов приложенной нагрузке.
3. Показано, что при наличии внутреннего усиления предварительное напряжение бетона существенно повышает момент трещинообразования и предельный момент испытанных

образцов на кручение. В среднем, увеличение T_{cr} и T_u составило 21,99% и 55,72%, соответственно.

4. Предложена теоретическая зависимость для определения несущей способности предварительно напряженных сталежелезобетонных балок в зависимости от прочности бетона на сжатие, величины предварительного напряжения и коэффициента жесткости элементов усиления, имеющая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

На основании регрессионного анализа получено много инвариантное уравнение для определения предельного крутящего момента для рассматриваемого типа балок в зависимости от факторов, учитывающих влияние количества и типа стальных ребер жесткости, предварительного напряжения арматуры. Согласно этому уравнению теоретический предельный крутящий момент, в сравнении с экспериментальными данными, определен с погрешностью от 0,3 до 7%.

5. Выполнены физически нелинейные расчеты рассматриваемых железобетонных балок, усиленных стальными ребрами жесткости, с учетом упругопластического деформирования и накопления повреждений (модель CDP). Отмечено, что в сравнении с экспериментальными данными, по результатам численных расчетов балки имеют более высокий уровень крутильной жесткости. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что, с одной стороны, в бетонной матрице имеется множество микротрещин, что связано с процессами усадки бетона при твердении. С другой стороны, в численных расчетах предполагается идеальное сцепление между бетоном, арматурой и ребрами жесткости. Таким образом, возникающий в реальных образцах эффект проскальзывания, приводящий к нарушению совместной работы бетона и армирующих элементов, не учитывается. В целом, полученные в результате численных расчетов результаты показывают хорошую корреляцию с экспериментальными данными (например, в значениях предельных крутящих моментов расхождения составили 1,024%). При этом для всех балок наблюдался характерный для кручения механизм разрушения из-за образования трещины, начинающейся на поверхности и распространяющейся к ядру балки, с формированием спиралевидной формы.
6. Представлены предложения и рекомендации, которые могут быть положены в основу дальнейших исследований.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях Scopus

1. **Roaa H. Al-Brees**, Mohamed I. Abu Mahadi, Thaar S. Al-Gasham, Alaa J. Naji. Three-dimensional final element analysis of composite steel - concrete arches. Periodicals of Engineering and Natural Sciences Original Research Vol. 11, No. 2, March 2023, pp.22-35.
2. **Roaa Hilmi Kadhim Al-Brees**, Paschal Chimeremeze Chiadighikaobi, Open Modal Qais Abdulrahman. A Review Study of the Mechanical Characteristics of Nano Concrete Reinforced with Hybrid Fiber. The Open Construction & Building Technology Journal June 2023.
3. **Roaa Hilmi Kadhim Al-Brees**, Mohamed Ibrahim Abu Mahadi, Alexey Semenovitch Markovich, Darya Aleksandrovna Golishevskaya. An Experimental and Numerical Study of Internally Torsional Strengthening of Box Beams Made from SCC Concrete. Engineering, Technology & Applied Science Research (ETASR) pp. 22874–22882, Jun. 2025.
4. **Roaa Hilmi Kadhim Al-Brees**, Khawla Abbas Farhan; Alaa J. Naji; H. M. Al-Jelawy. Effect of Coarse Plastic Waste Aggregates on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns and Their Life Cycle Assessment. 6th Iraqi International Conference on Engineering Technology and Its Applications (ICETA), pp. 318–323, 2023 DOI:10.1109/ICETA57613.2023.10351447

Публикации в изданиях, входящих в перечень РУДН/ВАК

1. **Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим**, Али Юсуф Мохамед // Изучение и оценка способов развития боковых напряжений внутри бетонных труб. Экономика строительства, №11 2022/2, с. 121-129.
2. **Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим**, Абу Махади Мохаммед Ибрагим, Алокозай Ахмад Шоайб. Нелинейное исследование отношения железобетонных балок кручению // Инновации и Инвестиции №12, 2022, с. 146-151.
3. **Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим**, Абу М.М., Аль-Хчаими М.Ж.Ж., Фадль М.Р.Ф. Влияние методов усиления на сопротивление кручению железобетонных балок // Components of Scientific and Technological, 2023, с. 8-25.
4. **Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим**, Абу М.М., Аль-Хчаими М.Ж. Исследование влияния включения порошкового известняка и мелкого кремнезема на характеристики самоуплотняющегося бетона // Инновации и инвестиции, №8, 2024, с. 532-528.
5. **Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим**, Абу Махади Мохаммед Ибрагим, Аль-Хчаими Муатаз Жаббар Жихел. Behavior of silty soil with sustainable geopolymers // Экономика строительства, 2024, с. 126-129, ISSN: 0131-7768 2

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Аль-Брис Роаа Хилми Кадхим

«Рациональные решения сталежелезобетонных балок, подверженных кручению, применительно к условиям Республики Ирак»

Настоящая работа посвящена экспериментально-теоретическому исследованию железобетонных балок коробчатого сечения, усиленных внутренними поперечными стальными ребрами жесткости, в условиях чистого кручения. Было изготовлено и испытано до разрушения четырнадцать образцов балок (как без предварительного напряжения арматуры, так и предварительно напряженных) размером 2100×300×300 мм с толщиной стенки 60 мм. Рассматривалось влияние типа и количества усиливающих элементов, предварительного напряжения арматуры на предельные значения крутящего момента, величину углов закручивания, продольные перемещения, деформации бетона, арматуры и элементов усиления, характер трещинообразования. Для каждого испытанного образца получена величина потенциальной энергии упругопластического деформирования, затраченная на его разрушение. Предложена теоретически обоснованная методика определения предельного крутящего момента для балок из самоуплотняющегося бетона, усиленных стальными ребрами жесткости. Предложенная методика верифицирована при помощи коммерческого программного комплекса Abaqus.

ABSTRACT OF THE DISSERTATION

Al-Brees Roaa Hilmi Kadhim

«Rational solutions for torsional steel-reinforced concrete beams for use in the Republic of Iraq»

This research study is devoted to the experimental and theoretical investigation of reinforced concrete box beams reinforced with internal transverse steel stiffeners under pure torsion conditions. Fourteen beam specimens (both prestressed and non-prestressed) measuring 2100 x 300 x 300 mm with a 60 mm wall thickness were fabricated and tested to failure. The influence of the type and number of reinforcing elements, as well as the prestressing of the reinforcement, on ultimate torque values, torsion angles, longitudinal displacements, deformations of the concrete, reinforcement, and the nature of crack formation were examined. The potential energy of elastic-plastic deformation required for failure of each tested specimen was determined. A theoretically based method for determining the ultimate torque for self-compacting concrete beams reinforced with steel stiffeners is proposed. The proposed method was verified using the commercial Abaqus software.