

Донцова Анна Евгеньевна

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ОБЛЕГЧЕННЫХ
СКЛАДЧАТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ
ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

доктор технических наук **Столяров Олег Николаевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Абу-Хасан Махмуд Самиевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор, кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук **Плюснин Михаил Геннадиевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», доцент, кафедра «Строительные конструкции», г. Кострома

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

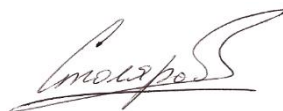
Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.2.1.1.35 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан «___» ноября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.1.35

доктор технических наук



Столяров О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью перехода к современным, долговечным и ресурсосберегающим строительным конструкциям. Повсеместно применяемым строительным материалом является железобетон. Его основные недостатки — большой вес и склонность арматуры к коррозии. Одной из альтернатив является текстильно-армированный бетон (ТАБ), позволяющий создавать легкие и долговечные пространственные конструкции с арматурой, не подверженной коррозии. ТАБ подходит для сложных пространственно-объемных конструкций, где прочность достигается формой (треугольные, трапецеидальные складки). Ключевой научной проблемой, сдерживающей применение ТАБ, является отсутствие научно обоснованных методик расчета и проектирования облегченных складчатых конструкций, учитывающих специфику работы материала (анизотропию, поведение при растяжении) и сложное напряженно-деформированное состояние складчатой структуры. Недостаточно изучено поведение конструкций из ТАБ под нагрузкой, и отсутствуют методы расчета, что создает высокий уровень неопределенности для проектировщиков. Отсутствует достаточная нормативно-техническая база, регламентирующая применение складчатых покрытий из ТАБ в массовом строительстве.

Степень разработанности темы.

Проблемам исследования и разработки строительных конструкций из волокнисто-армированного бетона посвящены работы отечественных (Баранова А.М., Бессонов И. В., Булгаков А.Г., Георгиев С. В., Жуков А. Д., Клюев С. В., Лесовик В. С., Лисичкин С. Е., Маилян Д. Р., Окольников Г. Э., Рубин О. Д., Попов Д. Ю., Пухаренко Ю. В., Соловьева А. И., Столяров О. Н., Шальнев В.М., Шарипова И.А. и других ученых) и зарубежных ученых (Butler M., Chudoba R., Curbach M., Du Y., Fishbain, B., Goldfeld Y., Gries T., Hegger J., Mechtcherine V., Muttoni A., Papanicolaou C. G., Quadflieg T., Rabinovitch O., Ruiz M., Si Larbi A., Silva F., Triantafillou T., Valeri P., Williams N., Woerd J. D., Zhu D. и других ученых). Вопросам работы складчатых конструкций посвящены работы отечественных (Киричков И. В, Кривошапко С. Н., Пасхин Д. В., Соколов Б. С., Страшнов С. В., Талантова К.В., Титаев В. А., Хайдуков Г. К., Шамаева Т. В., Школьный П. А., и других ученых) и зарубежных (Гольденблат И., Карбхари В., Николлс Р., Ратц Э., Элс Г. и других) ученых.

Цель работы состоит в разработке методики расчета складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона на основе экспериментальных исследований их прочности и деформативности.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ существующих складчатых конструкций, методов их проектирования и расчета.
2. Опытное изготовление прототипов одноволновых и многоволновых складчатых конструкций из ТАБ.
3. Экспериментальное исследование прочностных свойств складок из текстильно-армированного бетона.
4. Численный расчет складчатых конструкций с текстильным армированием, установление соответствия между численными и экспериментальными моделями.
5. Разработка рекомендаций по проектированию и расчету складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона.

Объект исследования: складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона.

Предмет исследования: прочность и деформативность складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона.

Научная новизна работы:

- разработаны и изготовлены опытные прототипы облегченных складчатых конструкций из ТАБ с различными типами сетчатой арматуры из стеклянных и углеродных ровингов;
- разработан метод проектирования и расчета складчатых строительных конструкций из ТАБ, учитывающий геометрию сечения складки и её механические характеристики;
- предложен способ изготовления тонкостенных облегченных складок из ТАБ, включающий изготовление опалубки при помощи 3D-печати или сборки из листов ЛДСП, состав мелкозернистой бетонной смеси и способ бетонирования - виброформование;
- предложен алгоритм выбора оптимальной формы складчатой конструкции из ТАБ, позволяющий с применением компьютерного моделирования проектировать конструкции требуемой несущей способности с наименьшей материалоемкостью;
- разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации облегченных складчатых покрытий, включающие модели изделий и конструкций из ТАБ.

Теоретическая значимость работы. Разработана методология проектирования складчатых строительных конструкций из ТАБ с учетом анализа различных форм поперечного и продольного сечения складок и толщин сечения, и выбором наиболее прочного и наименее материалоемкого сочетания габаритов складки. Представлена классификация складчатых строительных конструкций из ТАБ по нескольким категориям конструкций. Разработан способ изготовления строительных изделий из ТАБ. Разработана конечно-элементная модель треугольной и трапецеидальной складчатой конструкции из текстильно-

армированного бетона, верифицированная на полученных экспериментальных данных с варьированием нескольких переменных.

Практическая значимость работы. Разработаны и экспериментально изготовлены одноволновые и многоволновые образцы складок из ТАБ. Экспериментально определены прочностные свойства складок из ТАБ. Построены обобщенные кривые нагрузка-перемещение для разрушения складок треугольного и трапецеидального сечения. Проведена оценка прочности ТАБ на изгиб в тонкостенных элементах. Определены сферы применения в строительстве складчатых конструкций из ТАБ, выявлены их преимущества по сравнению с уже применяемыми строительными конструкциями и обоснованы ограничения применения складчатых конструкций из ТАБ.

Методология и методы исследований. Поставленные в исследовании задачи решались с использованием иерархического построения исследования от элементарных частей конструкций к более сложным их сочетаниям. При проведении исследования выбраны следующие методы:

- аналитический обзор существующих методов проектирования складчатых конструкций и исследование их применимости к текстильно-армированным бетонным конструкциям, построенное на обобщении результатов предшествующих исследований по теме;

- экспериментальные модельные исследования: испытания элементов из ТАБ на изгиб, испытания несущей способности поперечного сечения складок при нагружении;

- численные исследования с применением метода конечных элементов, численных методов расчета пространственно-объемных конструкций.

Личный вклад автора диссертационной работы. Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии. Все опубликованные научные работы, выполненные в соавторстве, приведены в Списке опубликованных работ.

Положения, выносимые на защиту:

- классификация складчатых конструкций из ТАБ;
- методы изготовления складчатых конструкций из ТАБ;
- методика экспериментального определения несущей способности складчатых конструкций из ТАБ;

- алгоритм проектирования складчатых конструкций из ТАБ на основе экспериментального определения прочностных свойств складок;

- рекомендации по разработке складчатых текстиль-бетонных покрытий.

Степень достоверности и обоснованности результатов. Степень достоверности и обоснованности результатов исследований

подтверждается статистически обоснованным объемом экспериментальных исследований; использованием современных средств и методов исследования; разработкой экспериментального стенда для изготовления опытных образцов; корректным использованием математического аппарата; применением статистической обработки экспериментальных результатов; использованием современного измерительного оборудования.

Апробация результатов работы. Результаты работы были представлены на международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии» (г. Калининград, 2023, 2024); всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ» (г. Санкт-Петербург, 2023); международной конференции «Civil, Industrial and Urban Construction – 2024» (г. Санкт-Петербург, 2024); международной конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (г. Санкт-Петербург, 2024); международной научно-практической конференции «Проектирование и расчет строительных конструкций и оснований (DeCaBuS'2024)» (г. Санкт-Петербург, 2024); семинаре секции строительной механики и надежности конструкций имени профессора Н.К. Снитко (Санкт-Петербург, Дом ученых им. М. Горького, 2025).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, включая 5 статей в журналах из актуального перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста и состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, словаря терминов и списка литературы из 236 наименований. Работа содержит 80 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, дана оценка степени исследованности проблемы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, определены основные направления и методы исследования. Изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор применения складчатых форм в различных инженерных областях, в частности, в строительстве и архитектуре. Рассмотрены основные виды складчатых конструкций, приведены существующие категоризации складок, предложена классификация складок по четырем категориям: по ориентации в пространстве; по форме складок; по общей форме конструкции, и по способу изготовления. Для исследования выбраны призматические складки с трапецеидальным и треугольным поперечным сечением как основополагающие формы складчатых конструкций. На Рисунке 1 показаны возможные формы поперечного сечения призматических складок.

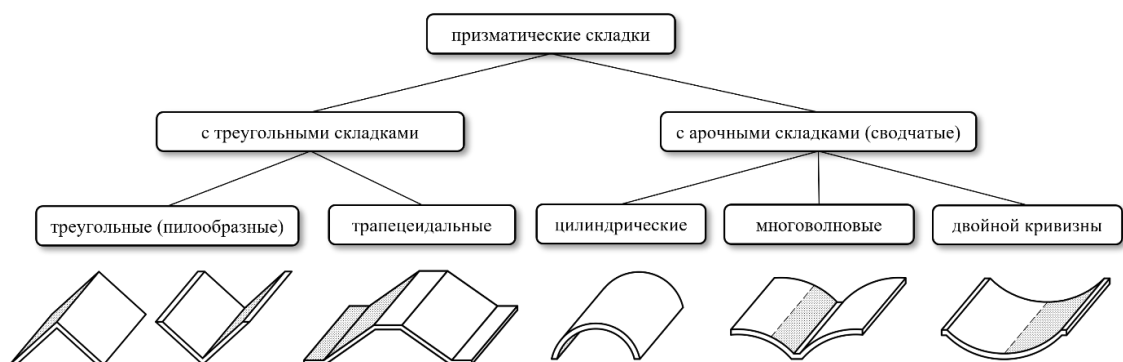


Рисунок 1 – Формы поперечного сечения призматических складок

Проведен обзор материалов для изготовления складчатых конструкций. Рассмотрены причины низкой распространенности складок из армоцемента. Выявлены существенные недостатки армоцемента, проявляющиеся в коррозии армирующих сеток. Для решения этой проблемы предложено изготовление складок из текстильно-армированного бетона – композита, состоящего из бетонной матрицы и армирующей сетки из высокопрочных волокон. Рассмотрены основные свойства ТАБ. Показана перспективность применения ТАБ для складчатых конструкций. Исследованы способы изготовления складок из ТАБ и прочие исследования, касающиеся складчатых форм из ТАБ.

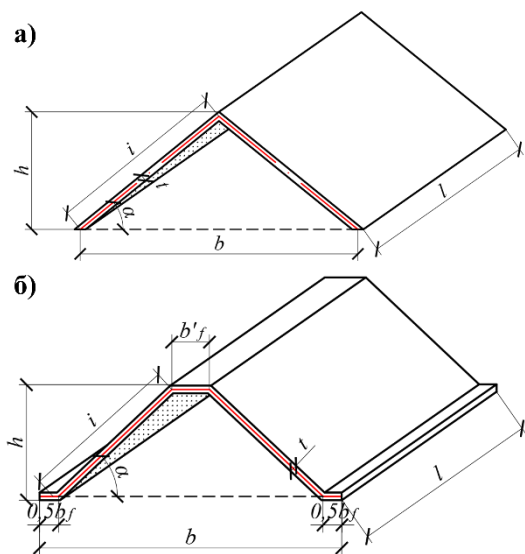


Рисунок 2 – Основные геометрические характеристики складки: а) треугольное сечение; б) трапецидальное сечение

Во второй главе описаны испытания экспериментальных прототипов складчатых элементов из ТАБ. Для этого были определены основные геометрические параметры складок, перечисленные в Таблице 1 и показанные на Рисунке 2.

Таблица 1 – Основные геометрические характеристики призматических складок

№ п/п	Обозначение, ед. изм.	Наименование параметра	Треугольная складка	Трапецидальная складка
1	t , мм	Толщина сечения	10	10
2	α°	Угол наклона складки к горизонту	$39,1^\circ$	$43,3^\circ$
3	l , мм	Длина складки	50	50
4	n	Число полных складок в элементе	1	1

Продолжение Таблицы 1

№ п/п	Обозначение, ед. изм.	Наименование параметра	Треугольная складка	Трапециевидальная складка
5	i , мм	Длина наклонной стенки складки (по оси)	260	260
6	h , мм	Высота складки	170	150
7	b , мм	Ширина складки	415	400
8	b_f , мм	Ширина нижнего основания	-	50
9	b'_f , мм	Ширина верхнего основания	-	50

Подобран состав мелкозернистой бетонной смеси для изготовления образцов, представленный в Таблице 2.

Таблица 2 – Состав мелкозернистой бетонной смеси кг/м³

Составляющее	Портландцемент М400	Кварцевый песок (0...0,6 мм)	Пластификатор	Вода
Масса	665	1213	10	245

Выбраны сетки из щелочестойких стеклянных (ЩС) и углеродных (УР) волокон для армирования складок, показанные на Рисунке 3.

Для бетонирования образцов выбран способ изготовления виброформованием. Для изготовления образцов подготовлены опалубочные формы.

Одноволновые малые складки изготавливались в формах, напечатанных на 3D-принтере. Прототип трехволновой складчатой конструкции был забетонирован в опалубке, изготовленной из ЛДСП. Выявлено, что использование 3D печати облегчает изготовление образцов сложной формы и снижает трудозатраты на подготовку опалубочных форм, но является дорогостоящим, поскольку опалубки являются одноразовыми.

Запроектированные поперечные сечения одноволновых складок показаны на Рисунке 4.

Для испытаний была изготовлена серия из 30 складок, из которых 15 были треугольными и 15 – трапециевидальными.

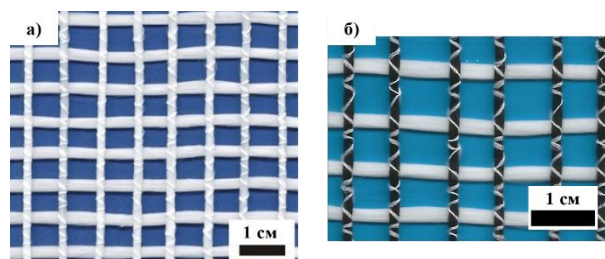


Рисунок 3 – Армирующая сетка: белые ровинги – ЩС; черные ровинги – УР; а) полотно с ЩС-армированием; б) полотно с УР-армированием

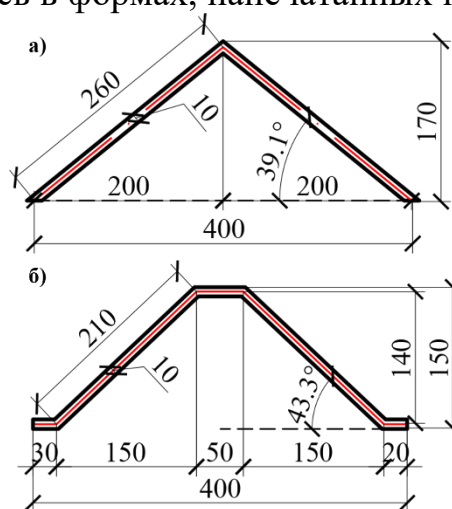


Рисунок 4 – Схемы поперечных сечений складок: а) треугольное сечение; б) трапециевидальное сечение

Из 15 образцов одинаковой формы сечения 5 были неармированы, 5 – армированы сеткой из ЩС ровингов и 5 армированы сеткой с УР ровингами. Трехволновая складчатая конструкция показана на Рисунке 5.

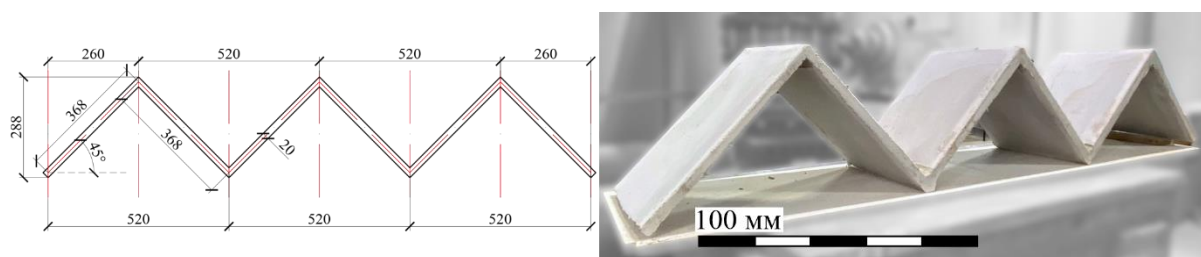


Рисунок 5 – Складчатая конструкция из трех треугольных складок: а) схема поперечного сечения; б) изготовленная конструкция

При подготовке к испытаниям одноволновых прототипов складок были исследованы возможные условия закрепления складок. Была выбрана схема закрепления с блокированием оснований складки от перемещения в горизонтальной плоскости, как показано на Рисунке 6, б), так как такие условия наиболее близко отображают работу складчатых конструкций в условиях эксплуатации.

Общий вид образцов на испытательной машине показан на Рисунке 7. Обобщенные результаты испытаний складок представлены в Таблице 3.

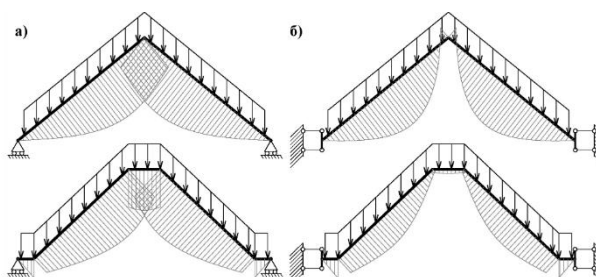


Рисунок 6 – Схема распределения моментов в сечении складки: а) при шарнирно закрепленных краях складки; б) при закреплении краев складки от перемещения по горизонтальной оси

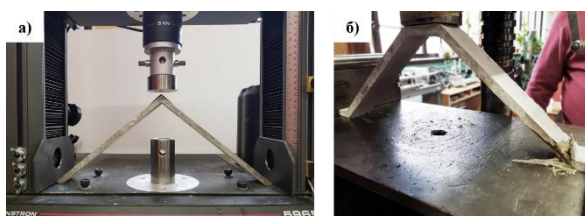


Рисунок 7 – Общий вид образцов на испытательной машине: а) Instron 5965; б) Amsler 1413

Таблица 3 – Разрушающая сила при испытании складок с закрепленными основаниями

Форма складки	Треугольник			Трапеция		
Армирование	нет	ЩС	У	нет	ЩС	У
Средняя разрушающая нагрузка, кН	5,9	4,8	3,6	8,0	8,7	11,0

Для складок трапецеидальной формы можно отметить соответствие полученных результатов ожидаемым: наибольшую несущую способность продемонстрировали складки, армированные наиболее прочными УР сетками. Для треугольных складок, наоборот, результаты противоречат ожиданиям: армированные складки разрушались при меньшем нагружении, чем неармированные. Предварительно это явление может быть объяснено

тем, что армирующая сетка при бетонировании треугольных складок оказалась в сжимаемой зоне складок. Получается, армирующие ровинги не работали эффективно, так как не испытывали растягивающих напряжений, и, вместе с этим, сократили активную площадь бетона в сжимаемом сечении.

Схемы локализации разрушающих трещин в образцах представлены на Рисунке 8.

На Рисунке 9 изображены обобщенные кривые «нагрузка-разрушение» для разных категорий складок, полученные при испытаниях.

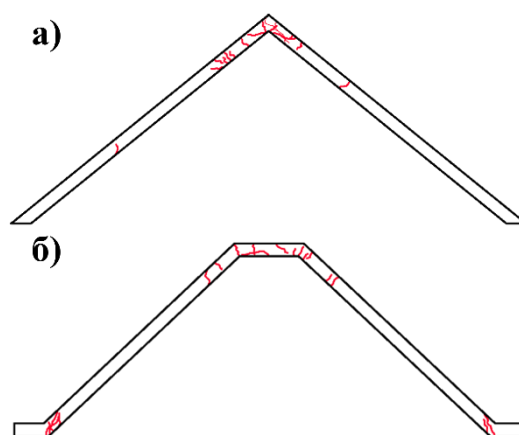


Рисунок 8 – Разрушающие трещины в складках: а) треугольной формы; б) трапецидальной формы

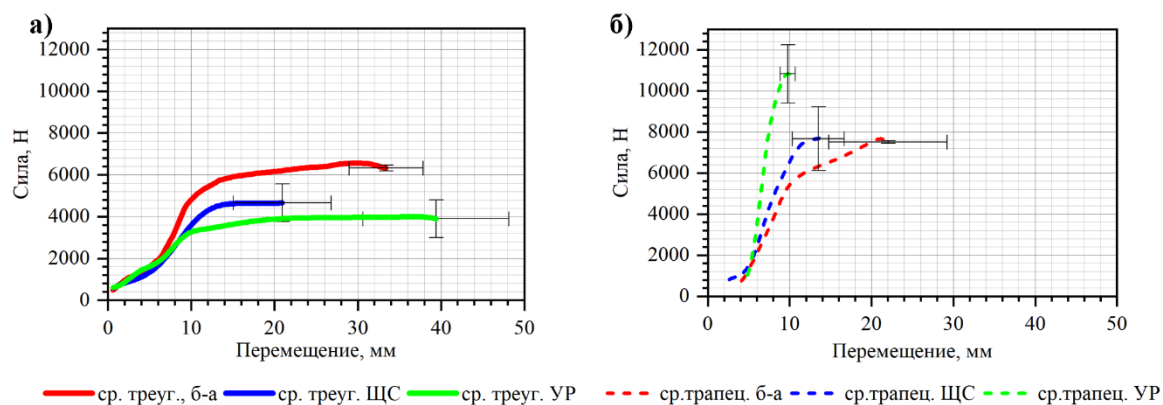


Рисунок 9 – Обобщенные диаграммы нагрузка-перемещение: а) для складок треугольной формы; б) для складок трапецидальной формы

Так как разрушение складок происходило в основном по линиям сгиба, плоские стенки складок из ТАБ были дополнительно испытаны на трехточечный изгиб с пролетом 150 мм между опорами, как показано на Рисунке 10.

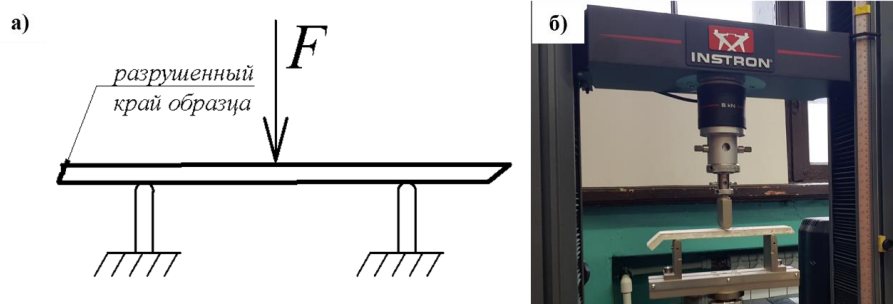


Рисунок 10 – Испытание образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб: а) схема нагружения; б) вид образца перед испытанием

По результатам испытаний на изгиб были составлены обобщенные диаграммы «напряжение-перемещение», показанные на Рисунке 11. Можно отметить сходство диаграмм с типовыми диаграммами «нагрузка-перемещение» для ТАБ, представленными в других исследованиях.

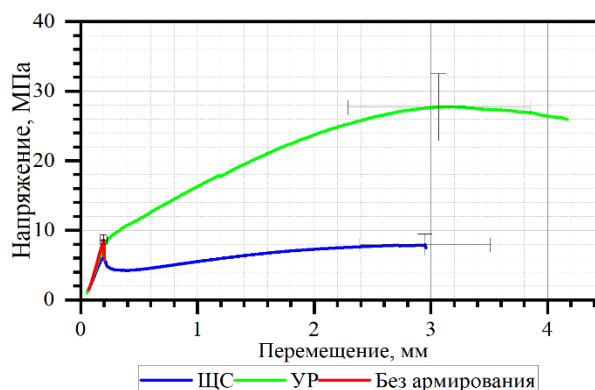


Рисунок 11 – Обобщенные диаграммы «нагрузка-перемещение» для плоских элементов из ТАБ

Результаты испытаний элементов из ТАБ на изгиб представлены в Таблице 4. В абсолютных значениях результаты близки к результатам, полученным в аналогичных исследованиях с аналогичными исходными материалами.

Таблица 4 – Результаты испытаний тонких элементов на изгиб

Тип армир.	Кол-во образцов, шт.	Среднее знач. пикового напряжения, МПа	Перемещение при пиковом напряжении, мм
без армир.	6	8,54±0,72	0,17±0,03
ЩС	15	9,17±1,55	5,44±1,45
УР	5	28,70±4,8	4,30±1,23

В третьей главе представлены аналитические расчеты конструкций из ТАБ и предложены модели конструкций из ТАБ для проектирования и применения в инженерной практике.

Рассмотрены подходы к расчету плоских элементов из ТАБ и проведена оценка соответствия результатов расчетов экспериментальным данным. Выявлено два основных подхода к расчету элементов из ТАБ, аналогичных расчету железобетонных изделий: первый подход принимает прочность армирования на растяжение в качестве критерия прочности конструкции, а второй учитывает также прочность бетона на сжатие в качестве критерия прочности конструкции. Результаты расчета показали довольно сильное несоответствие экспериментальным данным. Для установления соответствия аналитических расчетов эксперименту были введены понижающие коэффициенты: 0,2 для первого подхода расчета и 0,25 для второго подхода. Сравнение аналитических и экспериментальных расчетов с учетом понижающих коэффициентов представлено графически на Рисунке 12.

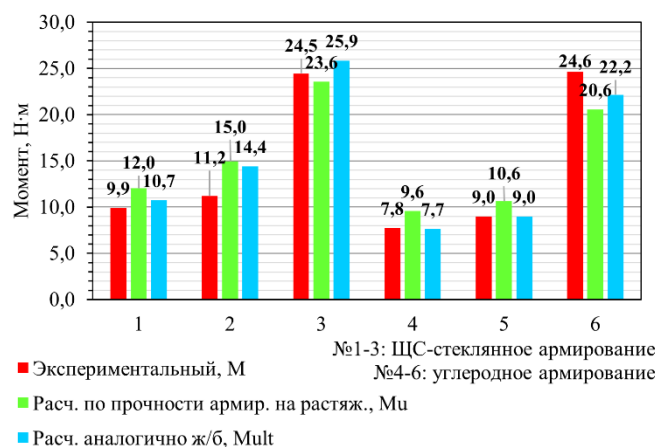


Рисунок 12 – Предельные изгибающие моменты для балочек из текстильно-армированного бетона, аналитические и экспериментальные данные

Рассмотрены причины возникновения таких значительных различий в расчетных и экспериментальных данных. Различия в сцеплении армирующих стержней с бетонной матрицей, анизотропность и немонолитность армирующего материала, состоящего из большого числа филаментов, внутреннее проскальзывание филаментов друг относительно друга – все эти факторы могут быть заложены в выявленном понижающем коэффициенте. Проанализированы другие подходы к расчетам элементов из ТАБ.

Изучен алгоритм расчета складчатых тонкостенных панелей с переходом к приведенному сечению. Проведено соответствие между геометрическими характеристиками складчатого и приведенного двутаврового или таврового сечения. Геометрическое соответствие трапецидального и двутаврового сечений показано на Рисунке 13.

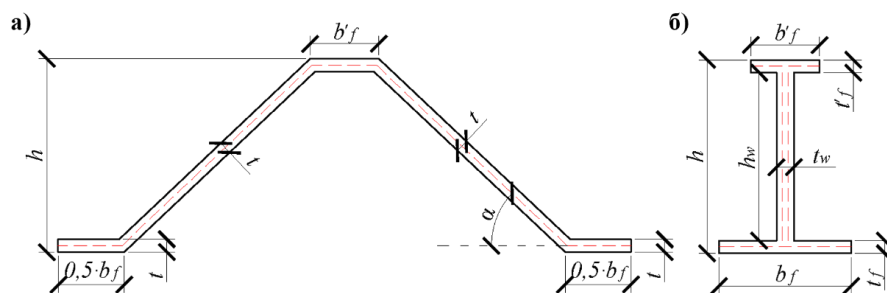
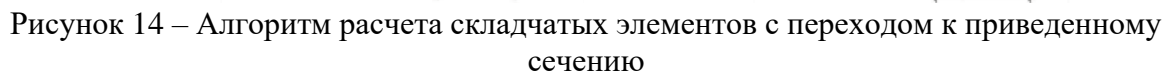


Рисунок 13 – Схемы сечений для перехода к приведенному сечению при расчете трапецидальных складок: а) исходного; б) приведенного

Выделен алгоритм расчета складчатых панелей с переходом к приведенному сечению. Алгоритм в виде блок-схемы представлен на Рисунке 14.



1. Армирование 2 сварными стальными сетками № 12,5-05 (ТУ 14-4-713-97); 4 стержнями Ø3 мм класса Вр-I (по ГОСТ 6727) в верхнем основании; 4 стержнями Ø4 мм класса Вр1400 в нижнем основании складки.

2. Армирование 1 сеткой № 12,5-05. Сопротивление растяжению $R_{mc_1} = 245 \text{ МПа}$; модуль упругости $E_{m_1} = 150000 \text{ МПа}$.

3. Армирование 1 сеткой из стекловолкна линейной плотностью 2400 текс. Сопротивление растяжению $R_{mc_2} = 914$ МПа; модуль упругости $E_{m_2} = 66500$ МПа.

4. Армирование 1 сеткой из углеродного волокна линейной плотностью 1600 текс. Сопротивление растяжению $R_{mc_3} = 2093$ МПа; модуль упругости $E_{m_3} = 173000$ МПа.

Из проведенного расчёта можно сделать вывод, что основное влияние на прочность складки в исходной задаче оказывает стержневая арматура в нижнем основании трапецеидальной складки. При удалении стержневой арматуры из сечения складки несущая способность сечения понижается на порядок. При этом, при использовании армирующей углеродной сетки несущая способность сечения оказывается сравнима с изначальной. Армирование сеткой из стеклянных ровингов повышает несущую способность сечения в 3,7 раза по сравнению со сварной сеткой.

Запроектированы модели строительных изделий и конструкций из ТАБ. На Рисунке 15 изображена предлагаемая скамья, как малая архитектурная форма из ТАБ. В части элементов городского хозяйства предложено изготовление дренажных и кабельных лотков, коллекторов и облицовочных панелей из ТАБ. В части внутренних элементов зданий запроектированы вентиляционный блок и лестничный марш, показанные на Рисунке 16. Предложено использование текстильного армирования в строительной 3D-печати.

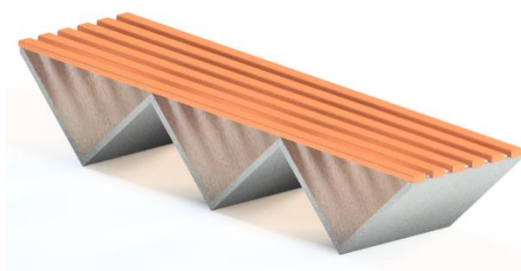


Рисунок 15 – Скамья из текстильно-армированного бетона

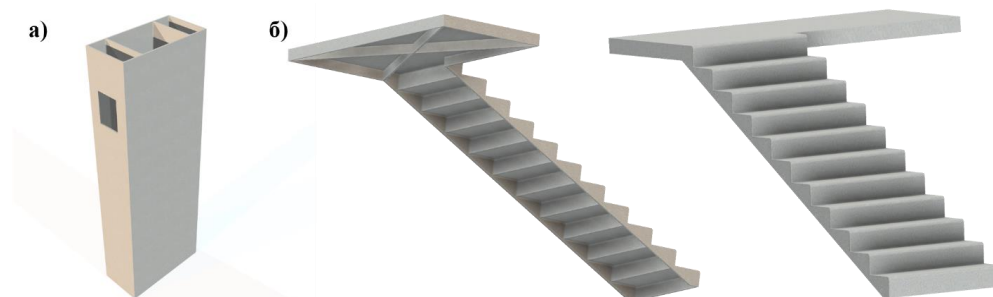


Рисунок 16 – Изделия из ТАБ для гражданского строительства: а) вентиляционный блок; б) лестничный марш

В части покрытий зданий и сооружений предложен ряд конструкций. На Рисунке 17 показаны складчатые покрытия из призматических складок с треугольными или трапециевидальными сечениями складок.

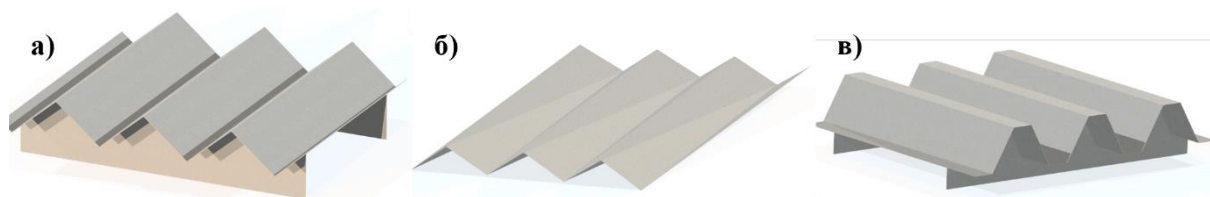


Рисунок 17 – Складчатое покрытие из призматических складок: а) треугольные складки; б) комбинированные треугольные складки; в) трапециевидальные складки

Для радиальных и купольных конструкций предложена origami-подобная конструкция купола из ТАБ, как показано на Рисунке 18.

Для сводчатых и протяженных покрытий и конструкций ангаров предложены комбинированные конструкции складчатых сводов из ТАБ, как на Рисунке 19.



Рисунок 18 – Модель складчатого купола

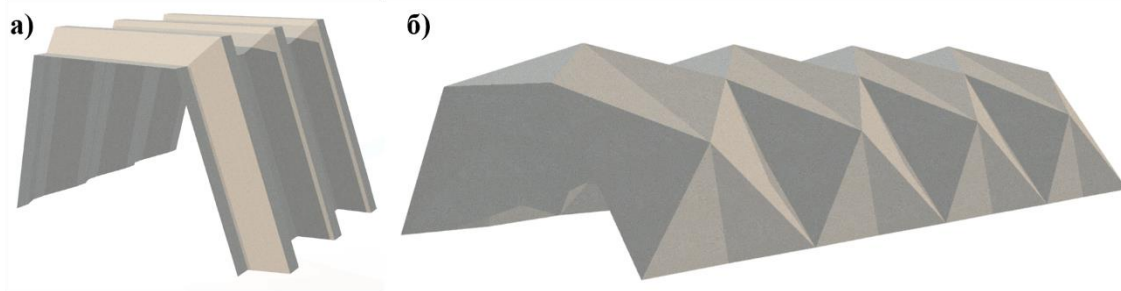


Рисунок 19 – Складчатые своды из ТАБ: а) на основе призматических складок; б) на основе треугольных складок и сложения оригами

В четвертой главе разработана конечно-элементная модель ТАБ в ПК Ansys Workbench (решение задач типа Static Structural). Проведена верификация модели на экспериментальных данных следующих испытаний: сжатие бетонных кубиков, изгиб балочек из бетона, изгиб пластин из ТАБ. Нормальные напряжения в пластинке из ТАБ при её разрушении на трехточечный изгиб показаны на Рисунке 20.

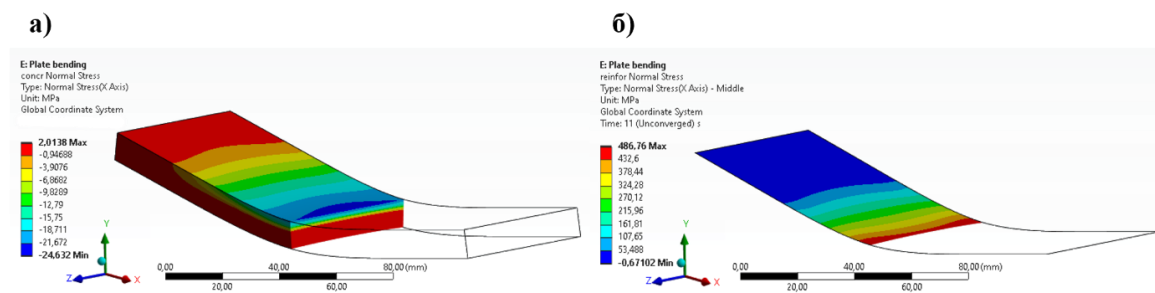


Рисунок 20 – Нормальные напряжения по горизонтальной продольной оси пластины в момент перед разрушением модели: а) в бетоне; б) в армировании

Для разрушения складок из ТАБ проведено соответствие между экспериментом и КЭ-расчетом, представленное в Таблице 5.

Таблица 5 – Разрушение складок из текстильно-армированного бетона

№	Армир.	Нагрузка при разрушении, кН					
		Трапецеидальная складка			Треугольная складка		
		Эксперим.	КЭ	Отклонен.	Эксперим.	КЭ	Отклонен.
1	Без армир.	8,0	8,40	5,0%	5,9	5,72	-3,1%
2	ЩС-ровинги	8,7	8,86	1,8%	4,8	6,23	29,8%
3	УР-ровинги	10,7	9,68	-9,5%	3,6	6,75	87,5%

Проведен анализ несущей способности складок в зависимости от угла наклона стенки к горизонту. Набор исследованных треугольных складок показан на Рисунке 21, а). Полученные результаты анализа представлены графически на Рисунке 21, б).

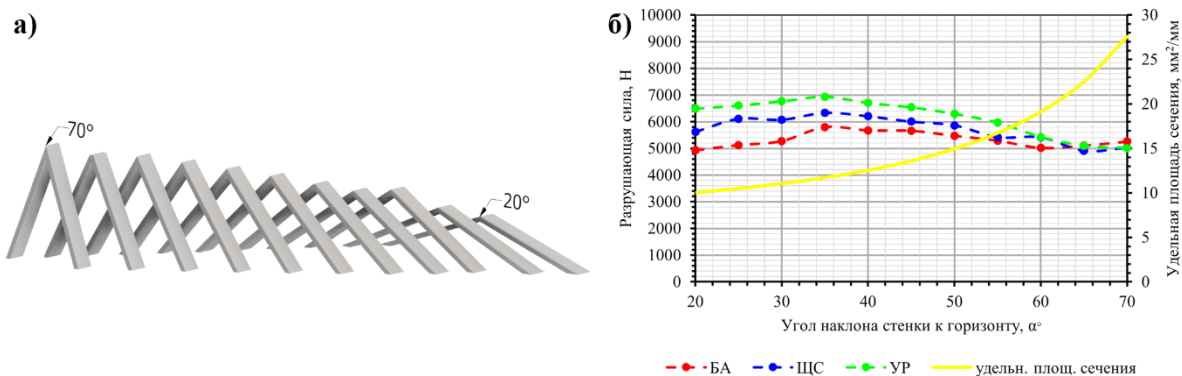


Рисунок 21 – Анализ треугольных складок в зависимости от угла наклона стенки:
а) исследованные модели; б) несущая способность и материалоемкость складки в зависимости от угла наклона стенки

По результатам анализа наилучшими сечениями для треугольных складок можно считать такие, в которых наклонная стенка находится под углом $30^\circ \dots 40^\circ$ к горизонту. Полученные результаты согласовываются с рекомендательными данными по проектированию складок, приводимыми в литературе для армоцементных складок.

Набор исследованных трапецидальных складок показан на Рисунке 22, а). Полученные результаты анализа представлены графически на Рисунке 22, б). По результатам анализа можно считать оптимальным для трапецидальных складок угол наклона стенки к вертикали $30^\circ \dots 40^\circ$, что также согласовывается с рекомендательными данными по проектированию армоцементных складок.

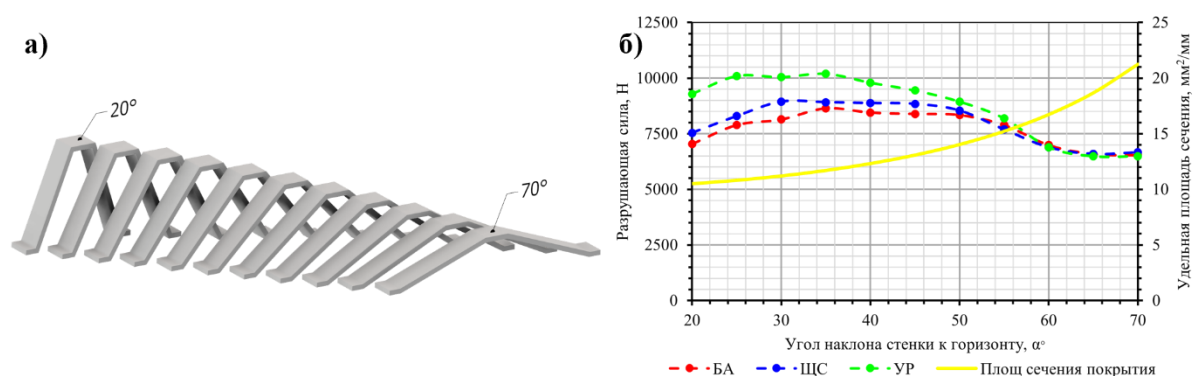


Рисунок 22 – Анализ трапецидальных складок в зависимости от угла наклона стенки:
а) исследованные модели; б) несущая способность и материалоемкость складки в зависимости от угла наклона стенки

Для трапецидальной складки с наклоном стенки к горизонту 35° был проведен анализ работы в пролете с варьированием длины панели, толщины сечения, и наличия или отсутствия армирования вдоль пролета. Результаты анализа представлены на Рисунке 23. По результатам полученных данных можно сделать вывод, что с выбранной формой поперечного сечения наилучше всего работу в пролете демонстрируют складки толщиной $t = 15$ мм на пролетах $1000 \dots 2000$ мм, поскольку обладают большей несущей

способностью по сравнению со складками толщиной 20 мм, и меньшей материалоемкостью.

На основании результатов моделирования, для многоволновой конструкции покрытия было выбрано трапецеидальное поперечное сечение складки с углом наклона стенки к горизонту 35° , толщиной сечения 15 мм; армированное по второму сценарию: с продольным и поперечным армированием; длиной 1700 мм. В покрытие входило от 2 до 6 отдельных складок. Результаты анализа представлены на Рисунке 24.

Прогибы в двухволновой, четырехволновой, и шестиволновой конструкциях показаны на Рисунке 25.

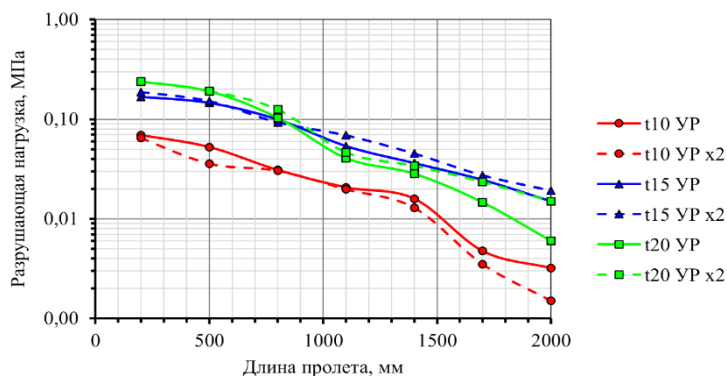


Рисунок 23 – Разрушающая нагрузка для складок в зависимости от величины пролета

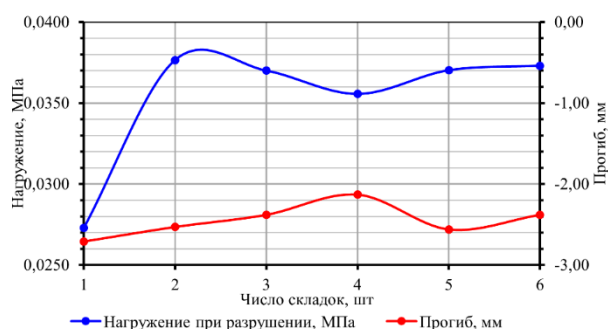


Рисунок 24 – Разрушающее напряжение и прогиб в центре пролета при разрушении многоволновой конструкции в зависимости от числа складок в конструкции

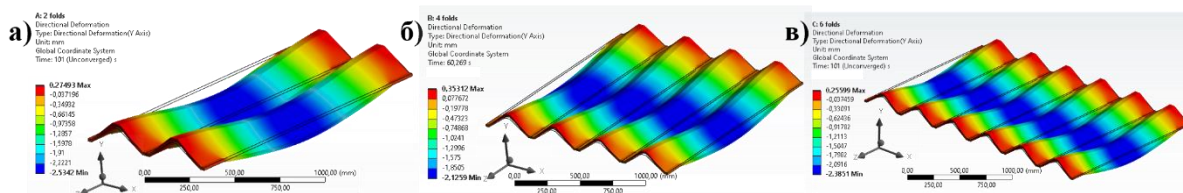


Рисунок 25 – Результаты расчета двухволновой (а), четырехволновой (б) и шестиволновой (в) складчатой конструкции с трапецеидальными складками. Момент, предшествующий разрушению модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты, полученные при выполнении работы:

1. Рассмотрены основные виды складчатых конструкций, области их применения и материалы для их изготовления. Предложена классификация складчатых строительных конструкций по: ориентации в пространстве; форме складок; форме всей конструкции; способу изготовления. Предложены области применения складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона. Изготовлены опытные образцы одноволновых и многоволновых складок. Запроектированы модели складчатых конструкций из ТАБ.

2. Проанализированы способы изготовления складчатых конструкций из бетона. Предложены методы изготовления складчатых конструкций из ТАБ, рассмотрены преимущества и недостатки предложенных методов. Предложено использование аддитивных технологий при изготовлении опалубок для экспериментальных образцов из ТАБ.

3. Экспериментально подтверждена несущая способность строительных конструкций из ТАБ, складчатых элементов из ТАБ треугольного и трапецидального поперечного сечения.

4. Проанализированы существующие способы расчета и проектирования складчатых конструкций. Выявлен алгоритм для расчета складчатых конструкций с переходом к приведенному тавровому и двутавровому сечению.

5. Разработана конечно-элементная модель текстильно-армированного бетона в программном комплексе Ansys. Проведена верификация модели на имеющихся экспериментальных данных. Проведен анализ работы складчатых конструкций из ТАБ под нагрузкой с варьированием ключевых параметров складок: угла наклона стенки к горизонту, толщины сечения, величины пролета. Проведен расчет многоволновой складчатой конструкции с трапецидальным поперечным сечением.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах из Перечня ВАК РФ

1. **Донцова А.Е.** Напряженно-деформированное состояние складчатых покрытий из текстильно-армированного бетона / А.Е. Донцова, О.Н. Столяров // Известия вузов. Строительство. – 2025. – №8. – С. 15-30.

2. **Донцова, А.Е.** Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона / А.Е. Донцова, О.Н. Столяров // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 2. – С. 215-230.

3. **Донцова, А. Е.** Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 82-99.

4. Столяров, О. Н. 3D-печать текстиль-бетонных конструкций / О. Н. Столяров, **А. Е. Донцова**, Г. Л. Козинец // Умные композиты в строительстве. – 2024. – Т. 5, № 4. – С. 21-34.

5. **Донцова, А. Е.** Мониторинг утечек воды в бетонных конструкциях с использованием встроенных датчиков на основе углеродных нитей / А. Е. Донцова, В. Я. Ольшевский, О. Н. Столяров // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – Т. 26, №78. – С. 71-80.

Прочие статьи в журналах

6. **Донцова, А. Е.** Расчет изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона по прочности / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Инженерные исследования. – 2025. – №1(21). – С. 3-11.

Труды конференций

7. **Донцова, А. Е.** Опытное изготовление складчатых конструкций / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Современные строительные материалы и технологии. Выпуск 6. – Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2025. – С. 270-281.

8. **Донцова, А. Е.** Проектирование и изготовление прототипов тонкостенных бетонных пространственных конструкций покрытий для экспериментальных исследований / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Современные строительные материалы и технологии. Выпуск 5. – Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2023. – С. 66-71.

9. **Донцова, А. Е.** Облегченные складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 03–09 апреля 2023 года. Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 391-393.