

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.421

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230

## Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона

**Анна Евгеньевна Донцова, Олег Николаевич Столяров***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследуется поведение складчатых элементов из текстильно-армированного бетона при нагружении. Текстильно-армированный бетон — относительно новый строительный материал, привлекающий все больший интерес исследователей. Поскольку плоские конструкции из текстильно-армированного бетона являются тонкими в сечении, они не подходят для покрытия пролетных зданий и сооружений. Однако при этом текстильно-армированный бетон хорошо подходит для изготовления складчатых покрытий, аналогичных покрытиям из армоцемента. Цель исследования — изучение прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой.

**Материалы и методы.** В рамках работы запроектированы, изготовлены и испытаны опытные образцы складок из текстильно-армированного бетона с армированием основовязаными сетками из щелочестойких стеклянных волокон (AR) и углеродных волокон (C). По результатам испытаний проведено сравнение свойств складок в зависимости от их формы (треугольная или трапецеидальная) и типа армирования.

**Результаты.** Средняя разрушающая нагрузка для треугольных складок составила 5,9 кН для неармированных образцов, 4,8 кН для образцов, армированных AR-ровингами, и 3,6 кН для образцов, армированных C-ровингами. Для трапецеидальных складок средняя разрушающая нагрузка — 8,0 кН для неармированных образцов, 8,7 кН для AR-армирования и 10,7 кН для C-армирования. Средняя прочность мелкозернистого бетона на сжатие — 25,08 МПа. Прочность элементов складок на изгиб — 7,29 МПа для неармированных образцов, 9,33 МПа для AR-армированных образцов и 15,4 МПа для C-армированных образцов.

**Выводы.** Существующей в настоящее время нормативной базы недостаточно для широкого применения изделий из текстильно-армированного бетона в строительстве. На сегодняшний день имеются разрозненные экспериментальные и теоретические наработки по механическим свойствам материала и поведению конструкций из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Приведены экспериментальные сведения о поведении складчатых элементов из текстильно-армированного бетона под нагружением.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** текстильно-армированный бетон, композитная арматура, покрытия, складки, оболочки, тонкостенные конструкции, облегченные бетонные конструкции, эксперимент

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Донцова А.Е., Столяров О.Н. Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 215–230. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230

Автор, ответственный за переписку: Анна Евгеньевна Донцова, anne.dontsoova@ya.ru.

## Strength and deformability of folded elements made of textile-reinforced concrete

**Anna E. Dontsova, Oleg N. Stolyarov***Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint-Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The behaviour of folded elements made of textile-reinforced concrete under loading is investigated. Textile-reinforced concrete is a relatively new building material that is attracting increasing interest from researchers. Because the elements of textile-reinforced concrete are thin in cross section, they cannot cover large-span buildings. However, textile-reinforced concrete is well suited for the production of folded shells, as in the case of ferrocement. The aim of this study is to investigate the strength of textile-reinforced concrete folds under loading.

**Materials and methods.** Textile-reinforced concrete folded specimens were manufactured. Warp-knitted meshes made of alkali-resistant glass fibres (AR) and carbon fibres (C) were used to reinforce the elements. The specimens were tested. Based on the test results, a comparison of the fold properties was performed depending on their shape (triangular or trapezoidal) and type of reinforcement.

**Results.** The average failure load for the triangular folds was 5.9 kN for nonreinforced specimens, 4.8 kN for specimens reinforced with AR rovings, and 3.6 kN for specimens reinforced with C rovings. For the trapezoidal folds, the average failure load was 8.0 kN for nonreinforced specimens, 8.7 kN for AR reinforcement, and 10.7 kN for C reinforcement. The average compressive strength of fine-grain concrete was 25.08 MPa. The flexural strength of the fold elements was 7.29 MPa for nonreinforced specimens, 9.33 MPa for AR-reinforced specimens, and 15.4 MPa for C-reinforced specimens.

**Conclusions.** The currently existing regulatory framework is insufficient for wide application of textile-reinforced concrete products in construction. To date, there are scattered experimental and theoretical studies on the mechanical properties of the material and the behaviour of structures made of textile-reinforced concrete under loading. Experimental data on the behaviour of folded elements made of textile-reinforced concrete under loading are presented.

**KEYWORDS:** textile-reinforced concrete, composite reinforcement, roofing, folds, folded elements, shell structures, thin-walled structures, lightweight concrete elements, experiment

**FOR CITATION:** Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Strength and deformability of folded elements made of textile-reinforced concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):215-230. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230 (rus.).

*Corresponding author:* Anna E. Dontsova, anne.dontsoova@ya.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Текстильно-армированный бетон представляет собой композит из мелкозернистого бетона и неметаллической армирующей сетки. Он является относительно новым материалом в строительстве. Считается, что текстильно-армированный бетон — это пересмотр армоцемента, широко используемого для конструирования пространственных покрытий зданий и сооружений в середине XX в. Возведение легких тонкостенных пространственных конструкций позволяло снизить перерасход бетона и собственный вес покрытий. В Ленинграде было возведено множество объектов с применением армоцементных элементов — арок, складок и панелей. В основном конструировались покрытия рынков, складов, трамвайных парков<sup>1, 2, 3</sup>. Яркий объект, сохранившийся до сих пор, покрытый армоцементными арками — здание Московского рынка (ул. Решетникова, 12). Складчатые конструкции можно найти на примере наземного павильона станции метро «Пионерская» и здания завода минеральных вод «Полострово».

Снижение популярности армоцемента обусловлено весомыми недостатками, выявленными в ходе эксплуатации конструкций с его применением. Низкая толщина элементов, выгодная с экономической и конструктивной точек зрения, оказалась недостаточной для защиты армирующих стержней от коррозии. В результате в течение относительно короткого времени эксплуатации армирующие стержни и сетки оголялись, бетонная матрица отслаивалась от армирующей основы, и стальные элементы подвергались коррозии под воздействием атмосферных факторов.

В изготовлении текстильно-армированного бетона используют полотна и сетки из высокопрочных нитей. Как правило, они состоят их щелочестойких

стеклянных, углеродных или базальтовых волокон. Перечисленные материалы не подвержены коррозии, и зачастую химически и электрически нейтральны. Замена армоцементных конструкций с металлическим армированием на конструкции из текстильно-армированного бетона дает развитие теории и методикам расчета пространственных покрытий зданий и сооружений.

Отсутствие коррозии арматуры у строительных конструкций из текстильно-армированного бетона является важным достоинством для применения таких конструкций в покрытиях зданий в России. Климатические особенности многих регионов страны, такие как высокая влажность воздуха, частые переходы температуры воздуха через 0 °С, и наличие в воздухе солей ввиду близости морского побережья провоцируют ускоренное оголение и коррозию стальной арматуры. Использование химически нейтральных волокон позволяет создавать более долговечные конструкции.

Отсутствие стального армирования в конструкциях также делает их более проницаемыми для радиосигналов, что особенно актуально в эпоху развития информационных технологий и беспроводной связи.

Пространственные покрытия по форме можно разделить на четыре большие группы: арочные, складчатые, оболочки ненулевой гауссовой кривизны и нерегулярные структуры. Складчатые конструкции получили развитие вместе с распространением железобетона. Основы расчета складчатых конструкций были введены Г. Элерсом, Г. Кремером, И. Гольденблатом, Э. Ратцем, П.А. Школьным в 1930–40 годы<sup>3, 4</sup>. «Безмоментные» теории расчета и теории расчета по методу сил были далее развиты и изложены в 1960 гг. Г.К. Хайдуковым<sup>5, 6</sup>. Инженеры нередко использова-

<sup>1</sup> Лысенко Е.Ф. Армоцементные конструкции / под ред. В.В. Гаркуша. Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1974. 208 с.

<sup>2</sup> Соколов Б.С. и др. Пособие по проектированию армоцементных конструкций. М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве, 2020. 103 с.

<sup>3</sup> Элерс Г. и др. Складчатые железобетонные конструкции / под общ. ред. проф. Я.В. Столярова. Харьков; Киев : Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1934. 136 с.

<sup>4</sup> Школьный П.А. Безмоментная теория расчета складчатых конструкций с несимметричным опиранием граней / под ред. Я.В. Столярова. Харьков : Государственное научно-техническое издательство Украины, 1937. 122 с.

<sup>5</sup> Армоцементные конструкции в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве / под ред. Г.К. Хайдукова. М. : Госстройиздат, 1963. 246 с.

<sup>6</sup> Тонкостенные железобетонные пространственные конструкции / под ред. Г.К. Хайдукова. М. : Госстрой СССР, Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, 1970. 231 с.

ли складчатые формы при проектировании покрытий павильонов станций Ленинградского метрополитена. Наиболее примечательна кровля павильона станции метро «Пионерская». В 20-х годах XXI в. присутствует тенденция повторного повышения интереса к использованию складчатых форм в архитектуре, о чем можно судить по возрастающему числу научных публикаций по данной тематике [1–6].

За последние годы наблюдается возрастающее число публикаций, исследующих текстильно-армированный бетон. Ведется всестороннее изучение свойств материала и поиск ниш, наиболее подходящих для его применения.

Все больше появляется исследований, посвященных сравнению различных типов армирования для выявления наилучшей комбинации армирующей сетки и бетонной матрицы [7–14]. В работе [8] изучается изменение прочностных свойств и схем разрушения текстильно-армированного бетона, армированного сеткой из щелочестойкого стекловолокна, в зависимости от конфигурации сеток и наличия эпоксидного покрытия ровингов. Ведется также подбор составов бетонных смесей, подходящих для изготовления изделий из текстильно-армированного бетона. Экспериментально исследованы возможности введения в бетонную смесь различных добавок, а также полимерной фибры для улучшения механических свойств готового композита [10]. Поскольку текстильно-армированный бетон может быть армирован углеродными волокнами, перспективным свойством такого композита является возможность осуществления мониторинга технического состояния конструкций: регистрирование трещин, отслеживание напряженно-деформированного состояния конструкции и фиксирование утечек в бетонных трубах и лотках [15, 16]. Рассматриваются не только возможности применения текстильно-армированного бетона как автономного строительного материала, но и возможности использования его в реставрации и укреплении уже имеющихся конструкций [17].

Одним из широко обсуждаемых недостатков текстильно-армированного бетона служит его слабая огнестойкость при армировании композита стеклянными сетками. Армирование углеродными ровингами, хоть и является более дорогостоящей альтернативой, считается более надежным в вопросах пожаробезопасности [9]. Еще один важный вопрос, требующий детального рассмотрения и экспериментального подтверждения, — долговечность текстильно-армированного бетона и предсказуемость его поведения под нагрузкой на всем сроке эксплуатации [18–20].

Малая толщина полотна из текстильно-армированного бетона делает его подходящим материалом для изготовления тонкостенных конструкций. Экспериментально изготовлен двутавр из текстильно-армированного бетона и испытан как однопролетная балка на четырехточечный изгиб [21]. В целом изготовление пространственных конструкций из тек-

стильно-армированного бетона — перспективное направление его применения [22–24]. Выполнено цифровое моделирование складчатых покрытий различных конфигураций из текстильно-армированного бетона [25, 26].

Несмотря на возрастающий интерес исследователей к представленному материалу, большинство статей по данной тематике — обзорные или аналитические. Для практического применения текстильно-армированного бетона в строительстве необходимо создание нормативной документации по проектированию и расчету строительных конструкций на его основе, которая, в свою очередь, должна опираться на экспериментальную и теоретическую базу.

Проектирование новых облегченных складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона основывается на исследованиях, проведенных ранее, результаты которых опубликованы в трудах [27–31]. Обоснован выбор формы складчатых конструкций [28]. Показаны технологические особенности изготовления тонкостенных элементов из текстильно-армированного бетона [27]. Конструктивные свойства другой категории облегченных пространственных покрытий — арок — представлены в публикации [31].

В данной работе впервые исследовано поведение трапецидальной и треугольной складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Проанализированы варианты армирования сетками из стеклянных и углеродных волокон. Обобщены сценарии разрушения складок и рассмотрено влияние закрепления складки на ее разрушение.

Цель исследования — изучение прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Для этого в работе поставлены следующие задачи:

1. Запроектировать складки, изготовить и провести испытания на их разрушение под нагрузкой на основании имеющихся знаний о складчатых бетонных конструкциях.
2. Сравнить свойства элементов конструкций из текстильно-армированного бетона, армированных различными высокомодульными волокнами, и неармированных элементов.
3. Экспериментально оценить свойства текстильно-армированного бетона для изготовления складок: прочность на сжатие, прочность на изгиб.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения испытаний прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона были запроектированы образцы складчатых строительных конструкций шириной  $b = 50$  мм, с толщиной сечения  $t = 10$  мм, армированные одной сеткой из стеклянных или углеродных ровингов, располагающейся на центральной оси сечения. Основой для проектирования складчатых сечений стали указания действующих нормативных документов,

а именно СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования» и СП 96.13330.2016 «Армоцементные конструкции». Запроектированные сечения изображены на рис. 1. Подробное обоснование выбора формы поперечных сечений складок приведено в труде [28].

Основные геометрические параметры запроектированных складок представлены на рис. 1 и сведены в табл. 1.

В промышленных условиях тонкостенные складки, как правило, изготавливают торкретированием. Однако в данной работе образцы складок были забетонированы при помощи виброформования. Для производства образцов одноразовые съемные опалубки из полилактида (PLA) напечатаны на 3D-принтере. В ходе предыдущих исследований выявлено, что такая оснастка является наименее ресурсозатратной в лабораторном исполнении для изготовления небольших образцов пространственных конструкций сложной формы. Опыт производства одноразовых и многоразовых опалубок из различных материалов для бетонирования складок изложен в работе [27].

Всего подготовлено 30 опалубочных формочек. Для каждой формы складки предназначалось по 15 опалубок, из которых 5 забетонировано без армиро-

вания, 5 — с армированием сеткой из стекловолокна, и 5 — с углеродным армированием. Опалубочные формы показаны на рис. 2.

### Мелкозернистый бетон

Для изготовления текстильно-армированного бетона используется мелкозернистый бетон. Размеры заполнителя ограничены размерами ячеек армирующей сетки. С целью свободного проникновения бетонной смеси через ячейки сетки и достаточного сцепления бетонной смеси с армирующей сеткой максимальный размер заполнителя не должен превышать 1–2 мм.

В данном исследовании складки бетонировались мелкозернистым бетоном на строительном кварцевом песке мелкой фракции. Производителем песка (ООО «ТД “Ремикс”», г. Санкт-Петербург, Россия) заявлено соответствие ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и следующие свойства песка: размер частиц 0–0,63 мм; содержание глинистой составляющей менее 5 %; содержание кварца более 82 %; температура обработки песка 700 °С. В качестве вяжущего использован портландцемент марки М400 (ЦЕМ II А-Ш 32,5). Для повышения удобоукладываемости смеси в состав бетонной смеси добавлялась пластифицирующая и водоредуцирующая добавки (ООО «Зика»,

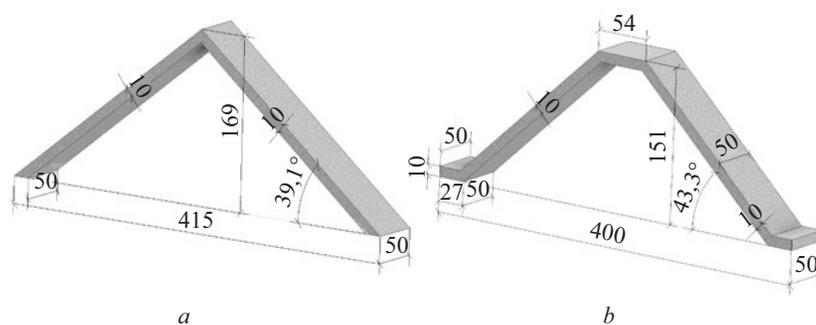


Рис. 1. Запроектированные складки: *a* — треугольная складка; *b* — трапециевидальная складка

Fig. 1. Textile-reinforced concrete folded elements: *a* — triangle fold; *b* — trapezoidal fold

Табл. 1. Геометрические параметры складок

Table 1. Geometric parameters of the folded elements

Характеристика Property	Треугольная складка Triangle fold	Трапециевидальная складка Trapezoidal fold
Ширина $b$ , мм Width $b$ , mm	50	50
Толщина сечения $t$ , мм Cross-section thickness $t$ , mm	10	10
Длина складки $l$ , мм Fold's length $l$ , mm	415	400
Высота складки $h$ , мм Fold's height $h$ , mm	169	151
Угол наклона стенки $\alpha$ Pitch (declination) $\alpha$	39,1°	43,3°
Ширина основания $b_p$ , мм Base width $b_p$ , mm	–	54



Рис. 2. Опалубочные формы: *a* — треугольная складка; *b* — трапецидальная складка

Fig. 2. Molds: *a* — triangular fold; *b* — trapezoidal fold

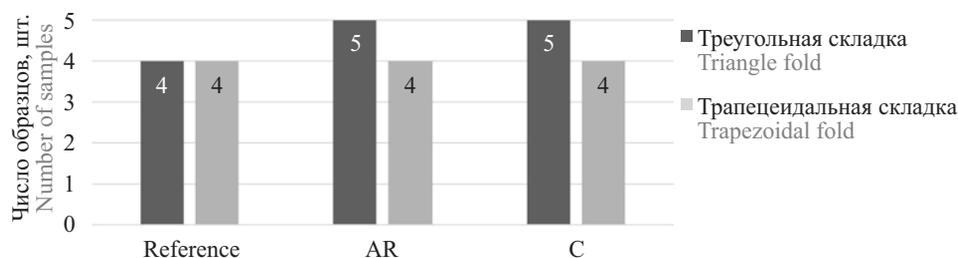


Рис. 3. Образцы складок для испытаний: reference — образцы без армирования; AR — армированные сеткой из щелочестойкого стекловолокна; C — армированные сеткой из углеродного волокна

Fig. 3. Tested folded elements: reference — non-reinforced specimens; AR — AR-glass textile reinforced specimens; C — carbon textile reinforced specimens

г. Лобня, Россия) на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров. Производителем заявлено соответствие добавки ТУ 2493-009-13613997–2011. Соотношение компонентов для замешивания 1 л бетонной смеси приведено в табл. 2.

После бетонирования образцы хранились в течение 28 дней во влажной среде для набора прочности бетона. После снятия опалубок было отбраковано 4 поврежденных образца: 1 треугольная складка без армирования и 3 трапецидальных складки каждого вида. Итоговый состав экспериментальных образцов приведен на рис. 3.

**Армирующие полотна из высокопрочных ровингов**

Образцы складок армировались основовязаными полотнами из щелочестойких стеклянных (AR) и углеродных (C) ровингов. Полотна представляли собой сетку с квадратными ячейками размером 6 × 6 мм. Для армирования образцов из полотен вырезались отрезки шириной 50 мм и длиной, соответствующей развернутой длине складчатого сечения по центральной оси. Армирующие полотна для складок со стеклянным армированием включали по 5 стеклянных ровингов. В армирующие полотна

для складок с углеродным армированием входило по 3 углеродных ровинга и 2 стеклянных ровинга. Перед бетонированием образцов армирующие полотна были обработаны жидким стеклом (силикатом натрия). Обработка ровингов жидким стеклом придает армирующим каркасам пространственную жесткость, а также улучшает прочностные свойства готового композита [32–35]. Основные свойства использованных стеклянных и углеродных ровингов представлены в табл. 3.

Важная характеристика армирующих сеток — коэффициент сетчатого армирования, который вычисляется как отношение площади армирования к площади всего сечения бетонного элемента по формуле (1). В сортаментах и нормативной литературе коэффициенты сетчатого армирования зачастую приводятся в виде удельных значений для сечения толщиной 10 мм:

$$\mu_m = \frac{A_m}{A}, \tag{1}$$

где  $A_m$  — площадь сечения всех ровингов, включенных в сечение;  $A$  — площадь сечения элемента.

Табл. 2. Состав бетонной смеси на 1 л

Table 2. Concrete mix components per 1 litre

Портландцемент М400, г Portland cement M400, g	Кварцевый песок, г Silica sand, g	Пластификатор, г Plasticizer, g	Вода, г Water, g	Суммарный объем, л Total volume, l
687	1253	7	253	1

Табл. 3. Основные свойства армирующих ровингов [19]

Table 3. Main properties of textile reinforcing rovings [19]

Тип ровинга Roving type	Линейная плотность, тек Linear density, tex	Прочность на растяжение, МПа Tensile strength, MPa	Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	Удлинение при максимальной нагрузке, % Elongation at max load, %
Стекланный (AR) Alkali-resistant glass	2400	914,1	66,5	1,74
Углеродный (C) Carbon	1600	2093	173	1,50



Рис. 4. Кубик из мелкозернистого бетона после испытания на сжатие

Fig. 4. Fine-grain concrete specimen after the compression test

В данной работе основную нагрузку воспринимают волокна, расположенные в сечениях, совпадающих с продольной осью (осью симметрии) складки. Такие сечения являются прямоугольниками с высотой  $t = 10$  мм и шириной  $b = 50$  мм, как указано выше. Соответственно, площади этих сечений равны  $A = 500$  мм<sup>2</sup>. Для складок, армированных только стекланными ровингами, коэффициент сетчатого армирования составлял  $\mu_g = 0,0083$ . Для складок, армированных углеродными и стекланными ровингами, коэффициент армирования углеродными ровингами —  $\mu_c = 0,0082$ .

#### Испытание кубиков на сжатие

Для проверки прочности использованной бетонной смеси из нее были изготовлены кубики с размером стороны 100 мм и испытаны на разрушение при сжатии. Испытание на сжатие проводилось в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы нагружались на гидравлическом прессе Amsler 1413 с возможностью нагружения образцов до 300 кН. Разрушенный образец в испытательной машине изображен на рис. 4.

Прочность бетона при сжатии рассчитана по формуле:

$$\sigma_{сж} = \alpha \frac{F}{A_k}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — масштабный коэффициент, для кубов с размером ребра 100 мм  $\alpha = 0,95$ ;  $F$  — разрушающая нагрузка;  $A$  — площадь рабочего сечения образца.

Площадь сечений образцов рассчитана по объемам образцов, проведенным штангенциркулем перед испытанием на сжатие.

#### Испытание складок

На настоящий момент отсутствует нормативно-технический документ, регламентирующий лабораторные или натурные испытания складчатых конструкций. Расчеты в основном ведутся аналитически. Может быть применено конечно-элементное моделирование для прогнозирования конструктивного поведения конструкций, как указано в трудах [25, 36]. В научной литературе не так много публикаций, описывающих именно конструктивные свойства складок из текстильно-армированного бетона. Взаимосвязь между общепринятыми способами расчета и фактическим поведением конструкций под нагрузкой требует детального рассмотрения.

Важным фактором, влияющим на результат испытаний складок на разрушение, служит схема закрепления складки при испытании. В научно-технической литературе, посвященной расчету складок, часто используется схема закрепления, приведенная на рис. 5. В частности, эта схема представлена на рис. 9.5 СП 387.1325800.2018. Крайние волны многоволновой конструкции рассматриваются как жестко заделанные консоли. Для средних волн принимается, что их продольные края не перемещаются в горизонтальной плоскости.

Как видно из рис. 5, края складки ограничены в перемещении по горизонтальной оси. Действительно, работая под нагрузкой в реальной конструкции, края складок будут ограничены от такого перемещения соседними складками. Именно эта особенность, возникновение так называемого «распора» в складчатой многоволновой конструкции, и способствует достижению тонкостенной облегченной складчатой конструкции жесткости и прочности, сравнимой с характеристиками монолитной плиты покрытия. При ограничении краев складки от перемещения по горизонтали иначе распределяются и моменты, действующие на сечение складки, что продемонстрировано на рис. 6.

Таким образом, для испытаний складок на разрушение необходимо ограничить края складок от перемещения, чтобы воссоздать эксплуатационные усло-

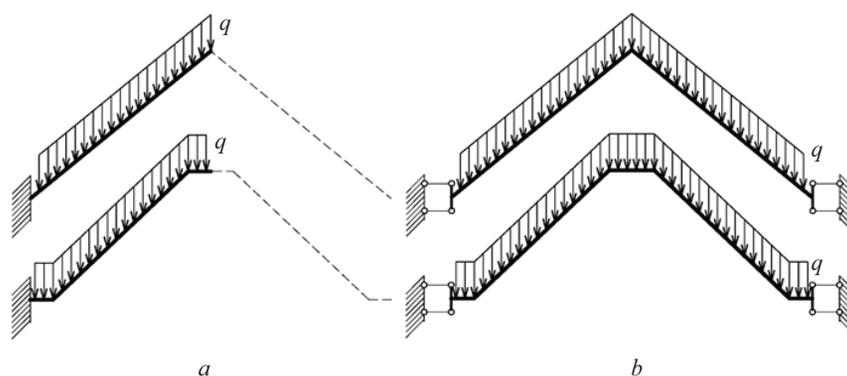


Рис. 5. Схема расчета складок в многоволновых складчатых оболочках: *a* — для крайней складки; *b* — для средней складки

Fig. 5. Design diagram of a multiwave folded plate shell: *a* — of an outer fold; *b* — for a middle fold

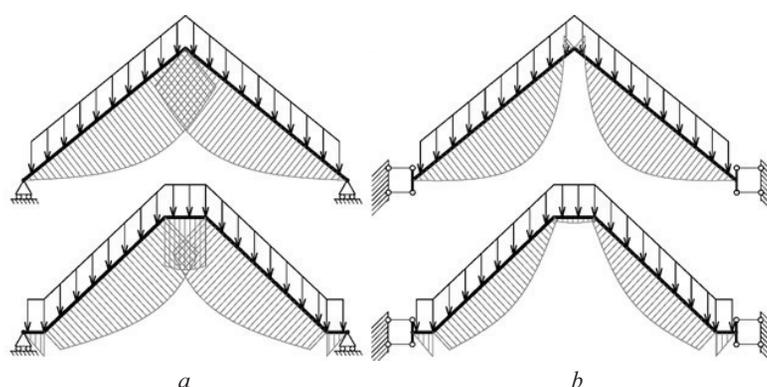


Рис. 6. Схема распределения моментов в сечении складки: *a* — при шарнирно закрепленных краях складки; *b* — при закреплении краев складки от перемещения по горизонтальной оси

Fig. 6. Bending moment diagrams for triangle and trapezoidal folds: *a* — no movement limitation along the horizontal axis; *b* — limited movement along the horizontal axis

вия работы конструктивных элементов. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 5965 на гидравлическом прессе Amsler 1413 с возможностью приложения нагрузки до 60 кН. Общий вид образца на испытательной установке приведен на рис. 7.

В научно-технической литературе складки, как правило, рассматриваются как равномерно нагруженные по верхней поверхности конструкции. Эта модель

нагрузки образцов была технологически трудно-осуществимой. Как видно из рис. 6 и 7, в данной серии экспериментов рабочий поршень испытательной машины воздействовал на верхний гребень складки, создавая распределенную нагрузку: линейно распределенную для треугольных складок и распределенную по площади для трапецидальных складок.

В ходе калибровки экспериментальных машин для нагружения образцов и регулировки условий за-

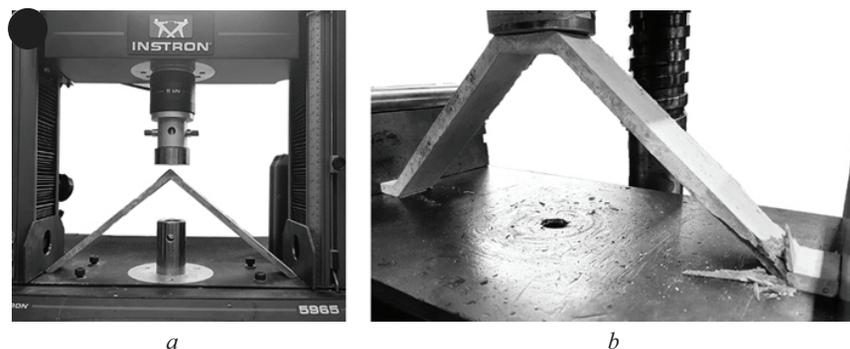


Рис. 7. Общий вид испытания на установке: *a* — Instron 5965; *b* — Amsler 1413

Fig. 7. The test setup for the testing of folds: *a* — Instron 5965 testing machine; *b* — Amsler 1413 testing machine

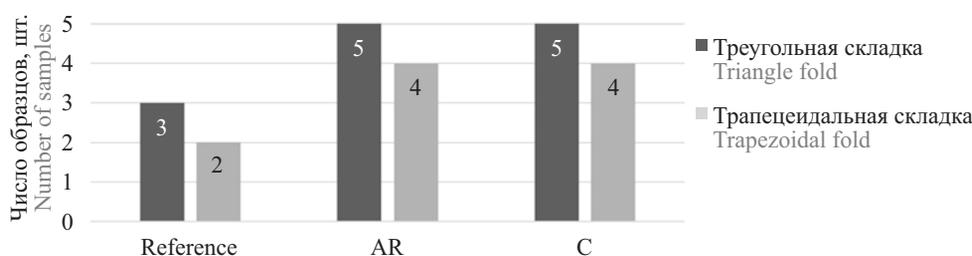


Рис. 8. Итоговый состав образцов складок перед испытаниями: reference — образцы без армирования; AR — армированные сеткой из щелочестойкого стекловолокна; C — армированные сеткой из углеродного волокна

Fig. 8. Number of the tested folded elements excluding the broken ones: reference — non-reinforced specimens; AR — AR-glass textile reinforced specimens; C — carbon textile reinforced specimens

крепления образцов было разрушено 3 неармированных образца без регистрации результата разрушения. Итоговый состав образцов складок перед испытанием приведен на рис. 8.

Нагружение образцов производилось с плавным возрастанием нагрузки до разрушения образца, т.е. до наступления первой группы предельных состояний.

### Испытание поперечных сечений складок на изгиб

После разрушения образцов складок при испытании на сжатие их наклонные стенки остались по большей части неразрушенными. Поэтому было принято решение провести проверочные испытания элементов из текстильно-армированного бетона на трехточечный изгиб на универсальной испытательной машине Instron 5965. Неразрушенные элементы образцов складок помещались на испытательную установку в соответствии со схемой на рис. 9, а. Расстояние между опорами составляло  $l_n = 150$  мм. Нагружение происходило с постоянной скоростью 1 мм/мин. Вид типового образца перед испытанием приведен на рис. 9, б.

Нагружение образца продолжалось до его полного разрушения. Напряжение при изгибе вычислялось по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_z}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{max}}$  — максимальный момент в однопролетной балке длиной  $l$ , определяется по формуле (4):

$$M_{\text{max}} = \frac{Fl}{4}; \quad (4)$$

$W_z$  — момент сопротивления сечения шириной  $b$  и высотой  $h$ , вычисляется по формуле (5):

$$W_z = \frac{bh^2}{6}. \quad (5)$$

После преобразований формула (3) примет вид:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_z} = \frac{Fl/4}{bh^2/6} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{bh^2}.$$

При рассмотрении результатов испытаний образцов на изгиб следует помнить, что испытания проводились на элементах уже разрушенных конструкций. Следовательно, хотя сами образцы могут выглядеть целыми, армирующие волокна в них уже претерпевали растягивающую нагрузку, а также возможно снижение сцепления армирующих ровингов с бетонной матрицей после предыдущего нагружения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Прочность мелкозернистого бетона

Результаты испытаний кубиков на сжатие сведены в табл. 4.

Поскольку данное исследование не сконцентрировано на определении прочности мелкозернистого бетона, было изготовлено всего 2 стандартных кубика для испытаний на сжатие. Данные результаты не позволяют статистически достоверно судить о прочности бетона. Тем не менее эти результаты согласовываются с предыдущими результатами испытаний кубиков из мелкозернистого бетона такого же

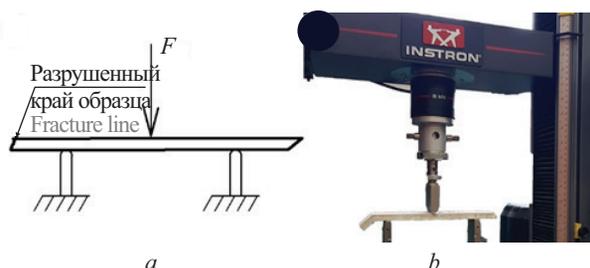


Рис. 9. Испытание образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб: а — схема нагружения; б — вид образца перед испытанием

Fig. 9. Three-point bending test of textile-reinforced concrete specimens: а — loading diagram; б — testing general view

Табл. 4. Результаты испытаний кубиков на сжатие

Table 4. Fine-grain concrete compression test results

Номер образца Specimen no.	Размеры, мм Dimensions, mm	Площадь поперечного сечения $A$ , м <sup>2</sup> Cross-sectional area $A$ , m <sup>2</sup>	Нагрузка при разрушении, Н Breaking force, N	Прочность бетона, МПа Strength of concrete, MPa
1	100,4 × 100,2 × 93,25	0,01006	234 000	22,10
2	100,2 × 101,0 × 93,6	0,01012	299 000	28,07

состава, представленными в работе [37]. Средняя прочность такого бетона на сжатие по данным предыдущих испытаний составляет 20,1 МПа, что ниже прочности кубиков, испытанных в настоящем исследовании. Разрушение кубика бетона в испытательной установке показано на рис. 4.

### Прочность складок из текстильно-армированного бетона

Диаграммы «нагрузка – перемещение», полученные при испытаниях складок, представлены на рис. 10.

Диаграммы нагружения складок показывают, что трапецидальные складки в общем случае являются более жесткими (красная, оранжевая, зеленая линии). Треугольные складки, наоборот, — более податливы, а на диаграммах нагружения треугольных складок присутствует довольно длинное «плато текучести», на котором нагрузка почти не изменяется.

Разрушающие нагрузки для образцов складок и средние значения разрушающих нагрузок для групп образцов приведены на рис. 11.

Результаты испытаний в табличной форме показаны в табл. 5.

Прочность складок трапецидальной формы с различным армированием соответствует предварительным ожиданиям — наиболее прочными ока-

зываются складки, армированные более прочными углеродными ровингами, а наименее прочными — складки без армирования. Неожиданными, наоборот, стали результаты испытаний треугольных складок: наибольшие усилия зарегистрированы при разрушении складок без армирования, а наименьшие — при разрушении складок, армированных углеродными ровингами. Предварительно это явление может быть объяснено тем, что армирующая сетка при бетонировании треугольных складок оказалась в сжимаемой зоне складок. Получается, что армирующие ровинги не работали эффективно, так как не испытывали растягивающих напряжений, и вместе с этим сократили активную площадь бетона в сжимаемом сечении. Детальное изучение этого явления, а также построение взаимосвязи результатов экспериментальных испытаний с расчетной моделью планируется провести в дальнейших исследованиях.

По результатам испытаний образцов были составлены схемы основных районов трещинообразования и разрушения у треугольных и трапецидальных складок (рис. 12). Армирующие волокна в местах трещин образцов были разорваны полностью или утончены, что сигнализирует об эффективной работе армирующих ровингов на изгиб.

Стоит отметить, что основным отличием армированных образцов от неармированных является

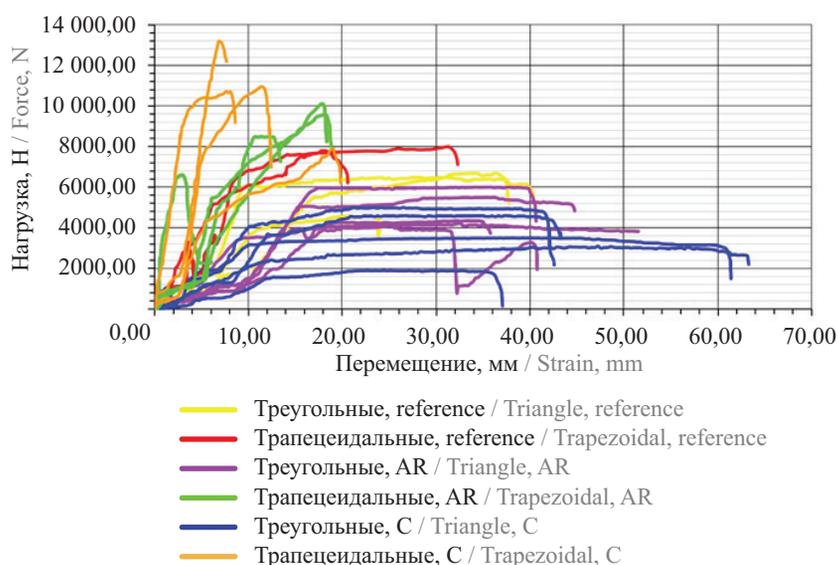


Рис. 10. Диаграммы испытания складок

Fig. 10. Fold test diagrams

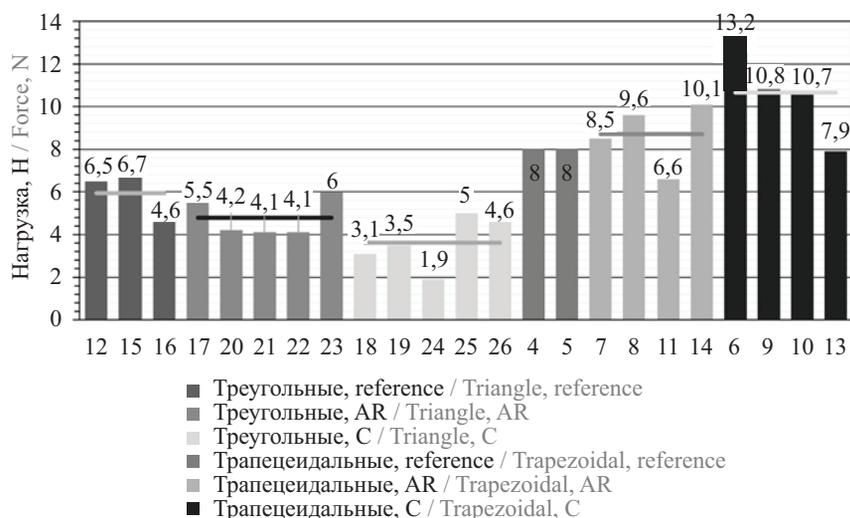


Рис. 11. Разрушающие нагрузки для образцов складок

Fig. 11. Ultimate breaking load for tested folded elements

характер разрушения. При отсутствии армирования хрупкая бетонная матрица разрушается с полным отказом конструкции. При наличии армирующей сетки конструкция сохраняет остаточную несущую способность даже после разрушения бетонной матрицы, что предотвращает обрушение конструкции.

**Прочность текстильно-армированного бетона на изгиб**

Как видно на рис. 13, по большей части разрушение образцов происходило на складках конструкций, что позволило использовать оставшиеся плоские элементы складок для испытаний на изгиб. На рис. 13

Табл. 5. Результаты испытаний образцов складок

Table 5. Test results of the fold specimens

Форма складки Type of the fold	Армирование Reinforcement	Номер образца Specimen no.	Разрушающая нагрузка, кН Breaking force, kN	Средняя разрушающая нагрузка для группы, кН Average breaking force, kN
Треугольник Triangle	-	12	6,5	5,9
		15	6,7	
		16	4,6	
	AR	17	5,5	4,8
		20	4,2	
		21	4,1	
		22	4,1	
		23	6	
	C	18	3,1	3,6
		19	3,5	
24		1,9		
25		5		
Трапеция Trapezoidal	-	4	8	8,0
		5	8	
	AR	8	8,5	8,7
		9	9,6	
		11	6,6	
		14	10,1	
	C	6	13,2	10,7
		7	10,8	
		10	10,7	
		13	7,9	

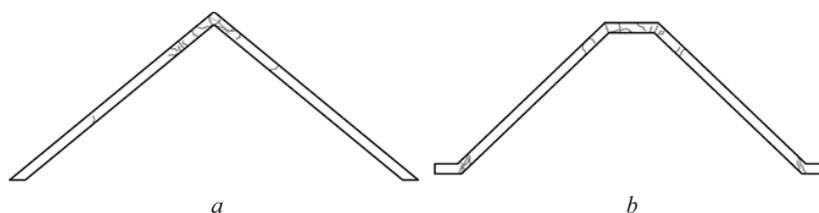


Рис. 12. Разрушающие трещины в складках: *a* — треугольной формы; *b* — трапецидальной формы  
 Fig. 12. Patterns of crack formation: *a* — for triangle folded elements; *b* — for trapezoidal folded elements

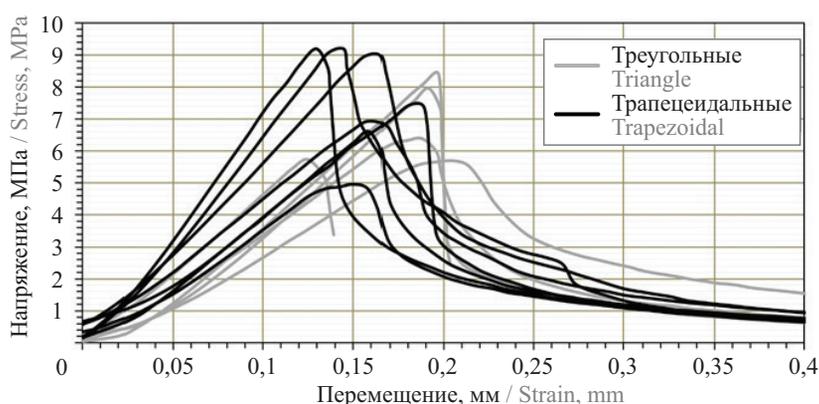


Рис. 13. Зависимость напряжения в образцах от перемещения при испытании неармированных плоских элементов на изгиб  
 Fig. 13. Stress-strain curves for three-point bending test for plain non-reinforced elements

приведены диаграммы «напряжение – перемещение» для неармированных образцов складок. Серым цветом показаны результаты испытаний элементов треугольных складок, черным — кривые, полученные для образцов трапецидальных складок.

Как видно из рис. 13, нарастание напряжения в неармированных элементах происходило по схожим сценариям, о чем можно судить по схожести диаграмм. Значения пиковых напряжений лежали в диапазоне от 4,96 до 9,19 МПа. Диаграммы «напря-

Табл. 6. Результаты испытаний тонких элементов на изгиб

Table 6. Three-point bending test numerical results for plain elements

Тип армирования Reinforcement type	Форма складки Fold type	Количество образцов, шт. Number of specimens	Пиковое напряжение, МПа Peak stress, MPa		Среднее значение пикового напряжения, МПа Average peak stress, MPa	Среднее значение по типу армирования, МПа Average value by type of reinforcement, MPa
			максимальное max	минимальное min		
—	Треугольная Triangle	5	8,46	5,7	6,85	7,29
	Трапеция Trapezoidal	7	9,19	4,96	7,61	
AR	Треугольная Triangle	8	26,46	6,16	13,42	9,33
	Трапеция Trapezoidal	6	10,8	6,15	7,6	
C	Треугольная Triangle	10	24,76	8,11	14,3	15,4
	Трапеция Trapezoidal	11	37,08	5,95	16,4	

жение – перемещение» для армированных элементов имели меньшую повторяемость, поэтому необходим дополнительный анализ для демонстрации и обсуждения диаграмм для текстильно-армированных элементов.

Результаты испытаний всех элементов на изгиб представлены в табл. 6.

По результатам испытаний выявлено, что наиболее прочными оказались образцы, армированные углеродными ровингами, наименее прочными — неармированные образцы, что соответствует ожидаемым результатам исследования. Неармированные образцы в данном исследовании демонстрируют более высокую прочность по сравнению с образцами из бетона того же состава, рассмотренными в предыдущих исследованиях [37, 38]. Средняя прочность на изгиб предыдущих аналогичных образцов составила 4,83 МПа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

Были запроектированы треугольная и трапециевидная складки из текстильно-армированного бетона толщиной сечения 10 мм, высотой 150 мм и длиной складки 400 мм. По запроектированным схемам изготовлено 30 образцов складок с различным армированием: 10 контрольных образцов без армирования, 10 образцов, армированных высокомодульными щелочестойкими стеклянными ровингами, и 10 образцов, армированных высокомодульными углеродными ровингами.

Образцы складок испытаны на разрушение при сжатии с закреплением краев складок от перемещения в горизонтальной плоскости. Средняя разрушающая нагрузка для треугольных складок

составила 5,9 кН для неармированных образцов, 4,8 кН для AR-армированных образцов, и 3,6 кН для С-армированных образцов. Для трапециевидных складок средняя разрушающая нагрузка составила 8,0 кН для неармированных образцов, 8,7 кН для AR-армированных образцов, и 10,7 кН для С-армированных образцов. Выявлено, что более эффективной оказалась работа армирующих ровингов в сечениях трапециевидных складок.

Кубические образцы мелкозернистого бетона, из которого изготовлены складки, были испытаны на сжатие, средняя прочность бетона на сжатие составила 25,08 МПа. Плоские прямолинейные элементы складок испытаны на трехточечный изгиб. Прочность образцов на изгиб составила 7,29 МПа для неармированных образцов, 9,33 МПа для AR-армированных образцов, и 15,4 МПа для С-армированных образцов. Установлено, что в общем случае С-армирование повышает изгибную прочность элемента больше, чем AR-армирование.

Результаты данного исследования могут быть соотнесены с аналитическими расчетами и результатами конечно-элементного моделирования аналогичных сечений складок. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для разработки теории расчета большепролетных складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона.

Проектирование складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона позволит снизить материалоемкость покрытий зданий и сооружений с сохранением прочности и долговечности конструктивных элементов. Стойкость армирующих волокон к коррозии особенно актуальна для применения конструкций из текстильно-армированного бетона в России ввиду наличия во многих регионах влажного климата с частыми переходами температуры через ноль градусов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Киричков И.В.* Тенденции развития складчатого формообразования в современной архитектуре // *Архитектура и дизайн.* 2019. № 2. С. 7–16. DOI: 10.7256/2585-7789.2019.2.30833. EDN LGTSQW.
2. *Van der Woerd J.D., Chudoba R., Scholzen A., Hegger J.* Oricrete // *Beton- und Stahlbetonbau.* 2013. Vol. 108. Issue 11. Pp. 774–782. DOI: 10.1002/best.201300057
3. *Valeri P., Guaita P., Baur R., Ruiz M.F., Fernández-Ordóñez D., Muttoni A.* Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion // *Structural Concrete.* 2020. Vol. 21. Issue 6. Pp. 2251–2267. DOI: 10.1002/suco.2019-00511
4. *Spartali H., van der Woerd J.D., Hegger J., Chudoba R.* Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb

- patterns // *The 2022 Annual Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2022).* 2022. Pp. 96–106. DOI: 10.5281/zenodo.10812858
5. *Ярмош Т.С., Храбатина Н.В., Мирошниченко В.В.* Складчатые конструкции. Перспективы развития новых форм // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2016. № 12. С. 71–75. DOI: 10.12737/22829. EDN XBFADR.
6. *Du W., Liu Q., Zhou Z., Uddin N.* Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures // *Thin-Walled Structures.* 2019. Vol. 137. Pp. 224–230. DOI: 10.1016/j.tws.2019.01.014
7. *Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W.* Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced con-

- crete in uniaxial tension // *Materials and Structures*. 2021. Vol. 54. Issue 6. DOI: 10.1617/s11527-021-01797-5
8. Zhu D., Bai X., Yao Q., Rahman M.Z., Li X., Yang T. et al. Effects of volume fraction and surface coating of textile yarns on the tensile performance of AR-glass textile reinforced concrete // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 71. P. 106420. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106420
9. Kapsalis P., Tysmans T., Hemelrijck D.V., Triantafillou T. State-of-the-art review on experimental investigations of textile-reinforced concrete exposed to high temperatures // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. Issue 11. P. 290. DOI: 10.3390/jcs5110290
10. Alma'aitah M., Ghiassi B. Development of cost-effective low carbon hybrid textile reinforced concrete for structural or repair applications // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 341. P. 127858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127858
11. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 334. P. 127434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127434
12. Nikravan A., Aydogan O.G., Dittel G., Scheurer M., Bhat S., Ozyurt N. et al. Implementation of continuous textile fibers in 3d printable cementitious composite // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Pp. 1243–1252. DOI: 10.1007/978-3-031-32519-9\_126
13. Zhang M., Deng M. Tensile behavior of textile-reinforced composites made of highly ductile fiber-reinforced concrete and carbon textiles // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 104824. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104824
14. Preinstorfer P., Yanik S., Kirnbauer J., Lees J.M., Robisson A. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish // *Composite Structures*. 2023. Vol. 312. P. 116859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116859
15. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring: a review // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Issue 15. P. 4948. DOI: 10.3390/S21154948
16. Becks H., Bielak J., Camps B., Hegger J. Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing // *Structural Concrete*. 2022. Vol. 23. Issue 4. Pp. 2600–2614. DOI: 10.1002/suco.202100252
17. Orłowski J., Beßling M., Kryzhanovskiy V. Prospects for the use of textile-reinforced concrete in buildings and structures maintenance // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 189. DOI: 10.3390/buildings13010189
18. Paul S., Gettu R., Arnepalli D.N., Samantha R. Experimental evaluation of the durability of glass Textile-Reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 406. P. 133390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133390
19. Столяров О.Н. Тонкостенные строительные конструкции из текстильно-армированного бетона : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2023. 334 с. EDN LYPMCK.
20. Alma'aitah M., Ghiassi B., Dalalbashi A. Durability of textile reinforced concrete: existing knowledge and current gaps // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 6. P. 2771. DOI: 10.3390/app11062771
21. Botelho Goliath K., Daniel D.C., de A. Silva F. Flexural behavior of carbon-textile-reinforced concrete I-section beams // *Composite Structures*. 2021. Vol. 260. P. 113540. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113540
22. Friese D., Scheurer M., Hahn L., Gries T., Cherif C. Textile reinforcement structures for concrete construction applications : a review // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 56. Issue 26. Pp. 4041–4064. DOI: 10.1177/00219983221127181
23. Stüttgen S., Akpanya R., Beckmann B., Chudoba R., Robertz D., Niemeyer A.C. Modular construction of topological interlocking blocks — an algebraic approach for resource-efficient carbon-reinforced concrete structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 2565. DOI: 10.3390/buildings13102565
24. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Vacuum-assisted die casting method for the production of filigree textile-reinforced concrete structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 2641. DOI: 10.3390/buildings-13102641
25. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical analysis of textile reinforced concrete shells: force interaction and failure types // *CivilEng*. 2024. Vol. 5. Issue 1. Pp. 224–246. DOI: 10.3390/civileng5010012
26. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. The numerical analysis of textile reinforced concrete shells: basic principles // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 5. P. 2140. DOI: 10.3390/app14052140
27. Донцова А.Е., Столяров О.Н. Проектирование и изготовление прототипов тонкостенных бетонных пространственных конструкций покрытий для экспериментальных исследований // *Современные строительные материалы и технологии*. 2023. С. 66–71. EDN JQSAXP.
28. Донцова А.Е., Столяров О.Н. Облегченные складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона // *Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всерос. конф.* 2023. С. 391–393. EDN FBKXFT.
29. Донцова А.Е., Ольшевский В.Я., Столяров О.Н. Композитные трубы из текстильно-армированного бетона в инженерных системах зданий и сооружений // *Неделя науки ИСИ : мат. Всерос. конф.* 2021. С. 10–12. EDN IGCRCF.
30. Донцова А.Е., Ольшевский В.Я., Столяров О.Н. Мониторинг утечек воды в бетонных конструкциях с использованием встроенных датчиков на основе углеродных нитей // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. № 26 (78). С. 71–80. EDN HGBALR.
31. Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L. Structural behavior of concrete arches reinforced with

glass textiles // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 6 (122). DOI: 10.34910/MCE.122.2. EDN SBCQRH.

32. Glowania M., Weichold O., Hojczyk M., Seide G., Gries T. Neue Beschichtungsverfahren für PVA-Zement-Composite in textildbewehrtem Beton. 2009.

33. Dilthey U. Application of polymers in textile reinforced concrete: From the interface to construction elements // ICTRC'2006 — 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete. 2006. Pp. 55–64. DOI: 10.1617/2351580087.006

34. Dilthey U., Schleser M. Composite Improvement of TRC by Polymeric Impregnation of the Textiles // International Symposium Polymers in Concrete. 2006. P. 446.

35. Quadflieg T., Leimbrink S., Gries T., Stolyarov O. Effect of coating type on the mechanical performance

of warp-knitted fabrics and cement-based composites // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 52. Issue 19. Pp. 2563–2576. DOI: 10.1177/0021998317750003

36. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of TRC Shells — Force Interaction and Failure Types. 2023. DOI: 10.20944/preprints202312.0700.v1

37. Koriakovtseva T.A., Dontsova A.E., Nemovala D.V. Mechanical and thermal properties of an energy-efficient cement composite incorporating silica aerogel // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 1034. DOI: 10.3390/buildings14041034

38. Коряковцева Т.А., Заборова Д.Д. Испытания экологического бетонного композита на основе растительной добавки и угольного фильтра // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 30 (82). С. 47–57. EDN TVFVAF.

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анна Евгеньевна Донцова** — ассистент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; anne.dontsoova@ya.ru;

**Олег Николаевич Столяров** — доктор технических наук, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; stolyarov\_on@spbstu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kirichkov I. The development trends of folded morphogenesis in modern architecture. *Architecture and Design*. 2019; 2:7-16. DOI: 10.7256/2585-7789.2019.2.30833. EDN LGTSQW. (rus.).

2. Van der Woerd J.D., Chudoba R., Scholzen A., Hegger J. Oricrete. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2013; 108(11):774-782. DOI: 10.1002/best.201300057

3. Valeri P., Guaita P., Baur R., Ruiz M.F., Fernández-Ordóñez D., Muttoni A. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. *Structural Concrete*. 2020; 21(6):2251-2267. DOI: 10.1002/suco.201900511

4. Spartali H., van der Woerd J.D., Hegger J., Chudoba R. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns. *The 2022 Annual Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2022)*. 2022; 96-106. DOI:10.5281/zenodo.10812858

5. Yarmosh T., Khrabatina N., Miroshnichenko V. The folded structure. Prospects for the development of new forms. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*. 2016; 12:71-75. DOI: 10.12737/22829. EDN XBFADR. (rus.).

6. Du W., Liu Q., Zhou Z., Uddin N. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures. *Thin-Walled Structures*. 2019; 137:224-230. DOI: 10.1016/j.tws.2019.01.014

7. Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete in uniaxial tension. *Materials and Structures*. 2021; 54(6). DOI: 10.1617/s11527-021-01797-5

8. Zhu D., Bai X., Yao Q., Rahman M.Z., Li X., Yang T. et al. Effects of volume fraction and surface coating of textile yarns on the tensile performance of AR-glass textile reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 71:106420. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106420

9. Kapsalis P., Tysmans T., Hemelrijck D.V., Triantafillou T. State-of-the-Art Review on Experimental Investigations of Textile-Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. *Journal of Composites Science*. 2021; 5(11):290. DOI: 10.3390/jcs5110290

10. Alma'aitah M., Ghiassi B. Development of cost-effective low carbon hybrid textile reinforced concrete for structural or repair applications. *Construction and Building Materials*. 2022; 341:127858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127858

11. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure. *Construction and Building Materials*. 2022; 334:127434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127434
12. Nikravan A., Aydogan O.G., Dittel G., Scheurer M., Bhat S., Ozyurt N. et al. Implementation of Continuous Textile Fibers in 3D Printable Cementitious Composite. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 1243-1252. DOI: 10.1007/978-3-031-32519-9\_126
13. Zhang M., Deng M. Tensile behavior of textile-reinforced composites made of highly ductile fiber-reinforced concrete and carbon textiles. *Journal of Building Engineering*. 2022; 57:104824. DOI: 10.1016/j.job.2022.104824
14. Preinstorfer P., Yanik S., Kimbauer J., Lees J.M., Robisson A. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish. *Composite Structures*. 2023; 312:116859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116859
15. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber Optic Sensors Embedded in Textile-Reinforced Concrete for Smart Structural Health Monitoring : a Review. *Sensors*. 2021; 21(15):4948. DOI: 10.3390/S21154948
16. Becks H., Bielak J., Camps B., Hegger J. Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing. *Structural Concrete*. 2022; 23(4):2600-2614. DOI: 10.1002/suco.202100252
17. Orłowsky J., Beßling M., Kryzhanovskiy V. Prospects for the Use of Textile-Reinforced Concrete in Buildings and Structures Maintenance. *Buildings*. 2023; 13(1):189. DOI: 10.3390/buildings13010189
18. Paul S., Gettu R., Arnepalli D.N., Samanthula R. Experimental evaluation of the durability of glass Textile-Reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 406:133390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133390
19. Stolyarov O.N. *Thin-walled building structures made of textile-reinforced concrete : thesis of doctor of technical sciences*. St. Petersburg, 2023; 334. EDN LYPMCK. (rus.).
20. Alma'aitah M., Ghiassi B., Dalalbashi A. Durability of Textile Reinforced Concrete: Existing Knowledge and Current Gaps. *Applied Sciences*. 2021; 11(6):2771. DOI: 10.3390/app11062771
21. Botelho Goliath K., Daniel D.C., de A. Silva F. Flexural behavior of carbon-textile-reinforced concrete I-section beams. *Composite Structures*. 2021; 260:113540. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113540
22. Friese D., Scheurer M., Hahn L., Gries T., Cherif C. Textile reinforcement structures for concrete construction applications : a review. *Journal of Composite Materials*. 2022; 56(26):4041-4064. DOI: 10.1177/00219983221127181
23. Stüttgen S., Akpanya R., Beckmann B., Chudoba R., Robertz D., Niemeyer A.C. Modular Construction of Topological Interlocking Blocks — an Algebraic Approach for Resource-Efficient Carbon-Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023; 13(10):2565. DOI: 10.3390/buildings13102565
24. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Vacuum-Assisted Die Casting Method for the Production of Filigree Textile-Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023; 13(10):2641. DOI: 10.3390/buildings13102641
25. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types. *CivilEng*. 2024; 5(1):224-246. DOI: 10.3390/civileng5010012
26. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. The Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Basic Principles. *Applied Sciences*. 2024; 14(5):2140. DOI: 10.3390/app14052140
27. Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Design and manufacturing of prototypes of thin-walled concrete spatial structures for experimental research. *Modern Construction Materials and Technologies*. 2023; 66-71. EDN JQSAXP. (rus.).
28. Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Lightweight folded structures made of textile-reinforced concrete. *ISI Science Week : collection of materials of the All-Russian conference*. 2023; 391-393. EDN FBKXFT. (rus.).
29. Dontsova A.E., Ol'shevskiy V.Ya., Stolyarov O.N. Composite pipes made of textile-reinforced concrete in engineering systems of buildings and structures. *ISI Science Week : materials of the All-Russian conference*. 2021; 10-12. EDN IGCRFC. (rus.).
30. Dontsova A.E., Olshevskiy V.Ya., Stolyarov O.N. Water infiltration detection of concrete structures using integrated carbon fiber sensors. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 26(78):71-80. EDN HGBALR. (rus.).
31. Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L. Structural behavior of concrete arches reinforced with glass textiles. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 6(122). DOI: 10.34910/MCE.122.2. EDN SBCQRH.
32. Glowania M., Weichold O., Hojczyk M., Seide G., Gries T. *Neue Beschichtungsverfahren für PVA-Zement-Composite in textiltbewehrtem Beton*. 2009.
33. Diltthey U. Application of polymers in textile reinforced concrete: From the interface to construction elements. *ICTRC'2006 — 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete*. 2006; 55-64. DOI: 10.1617/2351580087.006
34. Diltthey U., Schleser M. Composite Improvement of TRC by Polymeric Impregnation of the Textiles. *International Symposium Polymers in Concrete*. 2006; 446.
35. Quadflieg T., Leimbrink S., Gries T., Stolyarov O. Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites. *Journal of Composite Materials*. 2018; 52(19):2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003
36. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. *Numerical Analysis of TRC Shells — Force Interaction and Failure Types*. 2023. DOI: 10.20944/preprints202312.0700.v1

37. Koriakovtseva T.A., Dontsova A.E., Nemova D.V. Mechanical and Thermal Properties of an Energy-Efficient Cement Composite Incorporating Silica Aerogel. *Buildings*. 2024; 14(4):1034. DOI: 10.3390/buildings14041034

38. Koriakovtseva T.A., Zaborova D.D. Study of an ecological concrete composite based on plant additive and charcoal filter. *Construction and Industrial Safety*. 2023; 30(82):47-57. EDN TVFVAF. (rus.).

*Received September 16, 2024.*

*Adopted in revised form on September 23, 2024.*

*Approved for publication on October 28, 2024.*

**B I O N O T E S:** **Anna E. Dontsova** — Assistant of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering of the Civil Engineering Institute; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 litera B, Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation; anne.dontsoova@ya.ru;

**Oleg N. Stolyarov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering of the Civil Engineering Institute; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 litera B, Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation; stolyarov\_on@spbstu.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interests.*