



Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа

Н. О. Борисов ✉, О. Н. Столяров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

✉ borisov.n@edu.spbstu.ru

Аннотация. Текстильное армирование бетонных конструкций является одним из перспективных направлений современного строительства. Такие конструкции являются легкими, прочными, устойчивыми, требуют меньшего количества материалов. Однако использование текстильно-армированного бетона в консольных конструкциях ранее не изучалось. Авторы спроектировали и изготовили прототипы облегченных бетонных покрытий консольного типа с текстильным армированием. Прототипы прошли экспериментальную проверку на прочность в лабораторных условиях, также было проведено конечно-элементное моделирование для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Результаты показали, что максимальная сила разрушения прототипа составила 400 Н, что эквивалентно напряжению в 4.08 МПа и превышает показатели бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза. Эффективность текстильного армирования была подтверждена в условиях критических нагрузок, при этом остаточная прочность конструкции обеспечила устойчивость после разрушения бетонной матрицы. Прототип может быть использован как основа для разработки коммерческих решений. Технология перспективна для применения в регионах с повышенными требованиями к надежности конструкций, включая сейсмоактивные зоны.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон, щелочестойкая стеклянная сетка, консольные конструкции, облегченные бетонные покрытия, остаточная прочность

Для цитирования: Борисов Н. О., Столяров О. Н. Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):81–92. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever structures

Nikita O. Borisov ✉, Oleg N. Stolyarov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation

✉ borisov.n@edu.spbstu.ru

Abstract. Textile reinforcement of concrete structures is promising trend in modern construction. These structures are lightweight, strong, stable, and require fewer materials. However, the use of textile-reinforced concrete in cantilever structures has not been previously studied. The authors designed and manufactured prototypes of lightweight textile-reinforced concrete cantilever coverings. The prototypes underwent strength testing in the laboratory. In addition, finite element modelling was performed to analyze the stress-strain state of the structures. The results showed that the maximum failure load of the prototype was 400 N, equivalent

to a stress of 4.08 MPa, exceeding the strength of B20 class concrete by 1.9-2.4 times. The effectiveness of textile reinforcement was demonstrated under critical loading conditions, and the residual strength of the structure provided stability after the concrete matrix failure. The prototype could form the basis of commercial solutions. This technology is promising for use in regions with stringent structural reliability requirements, including seismically active zones.

Keywords: textile-reinforced concrete, alkali-resistant glass mesh, cantilever structures, lightweight concrete covers, residual strength

For citation: Borisov N. O., Stolyarov O. N. Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever structures. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):81–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92>



1. Введение / Introduction

Традиционные строительные материалы, такие как железобетон и сталь, остаются основой современного строительства благодаря прочности и долговечности. Однако использование этих материалов связано с рядом проблем: большим весом, необходимостью значительных материальных затрат на поддержание конструкций в период эксплуатации, а также подверженностью стали коррозии, что требует постоянного обслуживания. Кроме того, традиционные материалы могут ограничивать архитектурные решения, препятствуя созданию сложных и инновационных конструкций.

Современные требования к строительным конструкциям стимулируют разработку новых материалов, которые способны минимизировать использование ресурсов и улучшить механические характеристики конструкций. Преимуществом таких материалов является повышение гибкости проектных решений. Один из перспективных материалов – текстильно-армированный бетон (ТАБ), который сочетает прочность бетона с легкостью и гибкостью текстильной арматуры. Это позволяет создавать более легкие и устойчивые конструкции, которые могут покрывать большие пролеты без утраты структурной целостности.

Замена стальной арматуры на текстильную из высокопрочных волокон является одним из способов сокращения получаемых объемов бетона [1]. Основными применяемыми армирующими материалами являются сетки из щелочестойких стеклянных и углеродных нитей (ровингов) [2].

В исследовании [3] приведена характеристика сдвиговых свойств текстильных армирующих материалов, работа [4] изучает влияние конструктивных параметров армирующих тканей на прочность высокопроизводительных ровингов в цементных композитах. Кроме того, активно исследуются методы минимизации отходов при производстве строительных элементов. В работе [5] проведен количественный анализ влияния различных методов предварительного изготовления строительных элементов на сокращение строительных отходов, что подчеркивает важность оптимизации производственных процессов. В статье [6] описаны результаты исследований, демонстрирующие возможности создания легких и устойчивых элементов с минимальным использованием материалов. Обзор [7] акцентирует внимание на методах снижения материальных отходов в строительстве, включая использование инновационных технологий и подходов. Поскольку данные армирующие материалы не подвержены коррозии, бетон, армированный текстильной арматурой, требует лишь минимального количества бетонного покрытия для обеспечения требований к защитному слою [8, 9].

ТАБ обладает высоким потенциалом для реализации конструкций с минимальным использованием материалов. Например, армирование может изготавливаться из непрерывных ровингов из стекловолокна или углеродных волокон и покрываться жидким стеклом или эпоксидной смолой. В результате достигается предел прочности до 3 000–4 000 МПа, что кратно превышает предел прочности арматурной стали. Текстильная арматура из углеродных нитей, в частности, востребована в бе-

тонном строительстве из-за нечувствительности к коррозии и низкой плотности. Более подробная информация о текущем состоянии исследований ТАБ обобщена в [6, 10–12].

Процессы аддитивного производства с цифровым управлением способствуют минимизации использования материалов, поскольку позволяют индивидуализировать производство структур очень сложной геометрии. Другим инновационным методом серийного производства элементов ТАБ является процесс экструзии, описанный в [13, 14]. Обычно неармированные и армированные микрофиброй бетонные компоненты производятся с помощью процессов экструзии, связанных с аддитивным производством [15–17]. В [18] предложен инновационный процесс, который позволяет интегрировать пропитанный текстиль в экструзию бетона и таким образом производить высокоэффективные композиты с прочностью на разрыв до 4 000 МПа. К реологическим свойствам свежего бетона, полученного в процессе экструзии, предъявляются высокие требования. После выхода из сопла должна быть достигнута достаточно высокая прочность в сыром виде, чтобы сохранить желаемую геометрическую форму [15, 18]. Чтобы решить эту проблему, в [18] была разработана испытательная установка для определения пригодности свежего бетона для процесса экструзии до реального процесса экструзии.

В дополнение к 3D-печати и экструзии бетона для производства бетонных компонентов, адаптированных к нагрузке, основанных на принципе «форма следует за силой», используются и другие методы производства, такие как ламинирование, торкретирование или центрифугирование. Например, в [19] были проведены обширные исследования по складыванию структур ТАБ на основе таких форм, как оригами или йошимура-оригами [20].

3D-печать позволяет размещать материал только в тех зонах, где это необходимо, что минимизирует расход бетона и открывает новые возможности для сложных геометрий. Исследование [21] анализирует этапы производства, процессы и физические основы аддитивного производства с использованием цементных материалов, включая экструзию. В работе [22] представлена концепция CONPrint3D, ориентированная на крупномасштабное строительство с применением монолитной 3D-печати бетона непосредственно на строительной площадке. Обзор [23] акцентирует внимание на развитии технологий экструзии бетона, предлагая дорожную карту для дальнейших исследований и внедрения. Исследование [24] рассматривает аддитивное производство железобетонных элементов, включая использование металлической арматуры, что позволяет улучшить механические свойства печатных конструкций. Наконец, работа [25] посвящена разработке стратегии экспериментальной характеристики механических свойств 3D-печатного бетона, что важно для оценки надежности и долговечности таких материалов. В [13] были исследованы формообразующие свойства экструдированных полос ТАБ, и удалось добиться радиуса изгиба до 10 см без видимых трещин и дефектов.

Стратегия минимизации материалов направлена на создание более легких конструкций с использованием меньшего количества материала. Соответствующую геометрию, адаптированную к нагрузке, можно найти, например, посредством оптимизации топологии [26, 27] и использования принципа «форма следует за силой» [28, 29]. В этом контексте внутренне разветвленные решетчатые структуры и внутренние узлы, стойки и связи имеют высокий потенциал. В [30] тонкосводчатая бетонная плита была разработана в соответствии с определенной геометрией, которая выдерживала в 2.5 раза большую расчетную нагрузку в более критическом сценарии асимметричной нагрузки.

Объектом нашего исследования являются облегченные консольные покрытия из текстильно-армированного бетона (ТАБ), предметом исследования – технологические и конструктивные особенности проектирования, изготовления и испытаний прототипов консольных конструкций, включая механические свойства, эффективность армирования и устойчивость к нагрузкам.

Цель исследования: разработать, изготовить и экспериментально испытать прототипы облегченных консольных конструкций с текстильным армированием. Основной задачей является под-

тверждение возможности улучшения прочностных характеристик и повышения долговечности за счет использования армирования из стекловолокна.

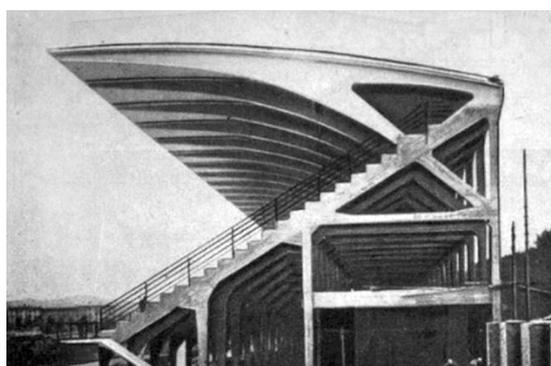
Новизна и актуальность исследования заключаются в предложенном и экспериментально опробованном подходе к созданию прототипов консольных покрытий с применением текстильно-армированного бетона, ранее не применявшегося в таких конструкциях. А также в использовании 3D-печатной опалубки, обеспечивающей высокую точность геометрии и минимизацию отходов, и в демонстрации остаточной прочности текстильно-армированного бетона, что открывает перспективы его применения в конструкциях, работающих в экстремальных условиях (например, в сейсмоактивных регионах).

2. Материалы и методы / Materials and methods

Для исследования возможностей текстильно-армированного бетона в конструкциях покрытий консольного типа проведено инженерное проектирование для разработки прототипа с учетом требований к прочности и легкости, а также лабораторные испытания для оценки механических характеристик прототипа. На текущий момент в открытых источниках отсутствуют исследования, посвященные применению ТАБ для консольных покрытий. Эти методы помогают выявить потенциал применения материала и определить его эффективность в конструкциях покрытий консольного типа. За образец взята конструкция навеса над трибунами стадиона по проекту Пьера Луиджи Нерви (рис. 1). Выбор обусловлен исторической значимостью данного объекта, ставшего новаторским для своего времени. Конструкция была выполнена с использованием армоцемента, который считался передовым решением для изгибных бетонных элементов. Однако у армоцементных конструкций есть существенный недостаток: стальная арматура со временем подвергается коррозии без достаточного защитного слоя из бетона, что приводит к разрушению конструкции. Применение текстильного армирования устраняет эту проблему благодаря его коррозионной стойкости, что исключает необходимость увеличивать поперечное сечение для дополнительной защиты. Это делает ТАБ более перспективным решением для долговечных консольных конструкций.

Для исследования применимости ТАБ в конструкциях консольного типа был выбран экспериментальный подход, включающий разработку прототипа, его изготовление и последующее испытание на прочность и устойчивость.

a)



b)



Рис. 1. Консольное покрытие стадиона во Флоренции:
а) на этапе строительства¹; б) современное состояние²
Fig. 1. Florence stadium cantilever roof: a) construction phase¹; b) present condition²

¹ Фото из книги: Иванова Е. К. Пьер Луиджи Нерви. Москва: Стройиздат, 1968. 126 с.

² Фото из открытых источников.

Основным компонентом для изготовления бетона являлся портландцемент марки М400, а также мелкий заполнитель – кварцевый песок с размером фракции 0–0.63 мм. Характеристики составляющих бетонной смеси представлены в таблице 1. Армирующий материал представлен стекловолокном, пропитанным жидким стеклом для повышения сцепления с бетонной матрицей. В качестве добавки использовался суперпластификатор для улучшения технологичности бетонной смеси. В рамках эксперимента использовались стандартный состав для получения бетона класса В20 и армирующая сетка из стекловолокна с оптимальным шагом плетения [1, 2].

Таблица 1. Характеристики составляющих бетонной смеси
 Table 1. Properties of concrete mix components

Материал	Характеристика	Значение	Состав (кг/м ³)
Цемент	Марка	М400	749
	Класс	ПЦ II/Б-32.5Н	
Крупный заполнитель	Не используется		–
Мелкий заполнитель	Тип	Универсальный кварцевый песок	1 367
	Размер фракции	0–0.63 мм	
	Насыпная плотность	1 450 кг/м ³	
Вода	Качество	Средней жесткости, с низким содержанием хлоридов и сульфатов, а также нейтральным рН	276
Добавки	Тип	Суперпластификатор	15
	Плотность	1.15 мг/л	
	рН	4.0–6.0	

Была подготовлена песчано-цементная смесь, в которой не используется щебень. Это обосновывается необходимостью адаптировать состав бетона к конкретным условиям и требованиям конструкции. Смесь бетона готовилась с помощью механического смесителя. В процессе заливки смесь вибрировалась на вибростоле для удаления воздушных пузырей и обеспечения плотного заполнения формы. Для определения прочностных характеристик полученной бетонной смеси были изготовлены четыре куба размером 10×10×10 см. Полученное значение сопротивления бетона при осевом сжатию составило 16.2 ± 0.4 Па, что соответствует призмочной прочности заданного класса бетона – В20.

На рис. 2 представлена армирующая сетка, используемая в данном исследовании. Характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 2. Оптимальный шаг плетения сетки из стекловолокна выбран на основе данных испытаний, проводившихся предыдущими исследователями [1, 2].

Для создания опалубки использовался 3D-принтер модели Raise3D Pro2 Plus с рабочей областью 305×305×605 мм, который позволил напечатать форму для бетонных образцов с толщиной стенок 1.2 мм. Процесс печати проводился при температуре 215 °С.

Испытания проводились на универсальной измерительной установке Instron 5965 с использованием специально изготовленной оснастки для фиксации прототипа конструкции. Измерение вертикальных перемещений производилось с помощью циферблатных индикаторов.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Конструирование прототипа

На основании вышеуказанных граничных условий была разработана 3D-модель конструкции опалубки (рис. 3). Изготовление опалубки предполагало создание образца сложной, но монолитной формы, что являлось ключевым условием для устранения возможных проблем с герметичностью стыков составных элементов. Основной контур модели повторяет сложное поперечное сечение консольных балок, а пространство между тремя балками формируется за счет двух вставных элементов.

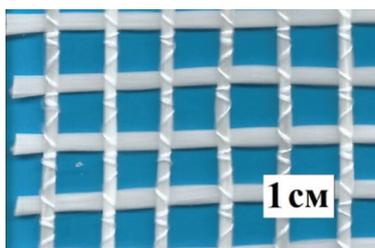


Рис. 2. Гибридная сетка из щелочестойких стеклянных ровингов (фото авторов)
Fig. 2. Hybrid alkali-resistant glass roving mesh (authors' photo)

В реальности консольное покрытие – это составная конструкция, соединения которой обеспечивают совместную работу всех элементов. Вследствие малых размеров прототипа было принято решение об изготовлении монолитного образца без необходимости обеспечения дополнительных связей для обеспечения условий работы, приближенных к реальным.

Опалубка для бетонирования была изготовлена из PLA-пластика методом 3D-печати. Размеры прототипа были выбраны на основе расчетных данных, учитывающих минимальные требования к толщине бетонного слоя и армированию. Толщина консоли составила 10 мм, что соответствовало масштабу реальной конструкции. Общая длина консоли составляла 650 мм, при этом она опиралась на три консоли с общей шириной покрытия 160 мм. Размер определялся по доступной области печати 3D-принтера (300 × 300 мм), поскольку планировалось печатать цельную опалубку без стыков и швов. Также на основании предыдущих исследований [2, 4] учитывалась минимальная толщина рабочего слоя бетона при армировании в одну нить – 10 мм. Длина консоли умещалась в поле печати в масштабе 1:30. Соответственно, толщина покрытия 10 мм и равное ей сечение консольной балки реальной конструкции в самом тонком месте на конце – 10 × 10 мм. Пропорции конструкции соблюдены в соответствии с оригинальными чертежами консоли. Для испытания были изготовлены два пролета покрытия протяженностью по 65 мм, опирающихся на три консоли. Общая ширина 160 мм. На рис. 4а показан процесс изготовления опалубки на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus с областью печати одним экструдером на столе размером 305 × 305 × 605 мм. Материал – пластик PLA, толщина стенок 1.2 мм без заполнения. Пара дополнительных формирующих вставок были выполнены с 10%-м заполнением. Температура печати 215 °С при температуре стола 70 °С (80 °С – при печати первого слоя) (рис. 4б).

Процесс бетонирования

Бетонная смесь была приготовлена по пропорциям таблицы 1. После приготовления смесь заливалась в опалубку и подвергалась виброобработке для устранения воздушных пустот и уплотнения материала. Образцы хранились в лаборатории при температуре 20 ± 2 °С и влажности 50 ± 5 % на протяжении 28 суток до проведения испытаний.

Таблица 2. Характеристики текстильного армирования
Table 2. Characteristics of textile reinforcement

Армирование	Щелочестойкая стеклосетка
Предел прочности на растяжение, МПа	1 010 МПа
Модуль упругости, ГПа	65 ГПа

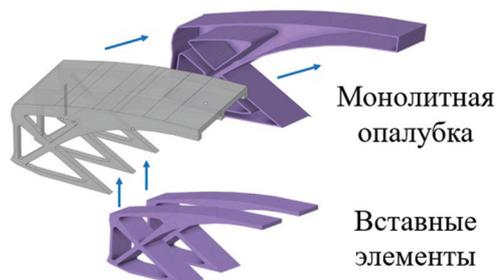


Рис. 3. Схема формирования конструкции (составлена авторами)
Fig. 3. Construction scheme (authors' illustration)

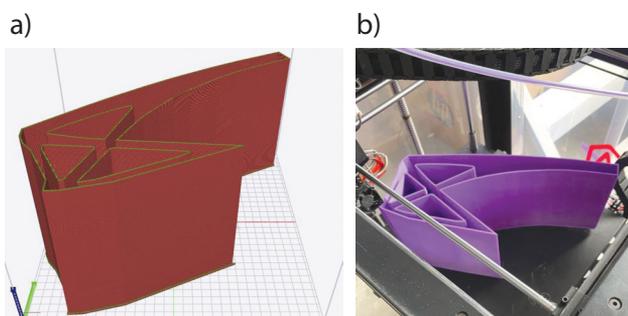


Рис. 4. Изготовление опалубки: а) 3D-модель; б) печать на 3D-принтере (модель и фото авторов)
Fig. 4. Formwork fabrication: а) 3D-model; б) 3D printing (model and photo by authors)

Для сохранения пространства между нитями и предотвращения деформации в процессе бетонирования текстильных арматурных нитей осуществлялась процедура пропитки их жидким стеклом и последующее выдерживание в течение 24 часов. Этот процесс обеспечивает необходимое сцепление между арматурой и материалом.

Как было сказано выше, процесс укладки бетона был запланирован таким образом, чтобы консоли и покрытие располагались боком, так, чтобы дно опалубки находилось внизу (рис. 5a). После установки армирующей сетки первый слой бетона толщиной 10 мм укладывался для формирования первой консоли и ее соединения с покрытием. Далее устанавливался первый вставной элемент высотой 65 мм и укладывался бетон для формирования пространства покрытия между консольными балками (рис. 5b). Аналогичные шаги повторялись для центральной консоли с толщиной слоя 10 мм и второго промежутка между балками шириной 65 мм. На заключительном этапе происходила укладка бетона третьей консоли – 10 мм. Таким образом заполнялась вся опалубка для формирования конструкции с расстоянием между боковыми поверхностями консолей в 160 мм. С целью предотвращения деформации опалубки внутренние полости последней были заполнены песком, а также применены струбцины (рис. 5c). Армирование прототипа минимально допустимой толщины осуществлялось вдоль центральной оси для соблюдения условий совместной работы бетона и арматуры. В реальных условиях арматура закладывается вдоль верхнего бетонного слоя конструкции консоли, поскольку именно там возникают растягивающие усилия.

На рис. 6 показаны опытные прототипы изготовленных конструкций.

Испытание опытного образца

Прототипы были подвергнуты испытаниям на универсальной испытательной машине Instron 5965 (производитель – Instron, Великобритания) с целью определения предела прочности на изгиб и устойчивости к нагрузкам. Нагрузка прикладывалась равномерно до разрушения образца, при этом использовалась пластина для равномерного распределения силы. Измерение деформаций осуществлялось с использованием циферблатных индикаторов, установленных на консольных элементах.

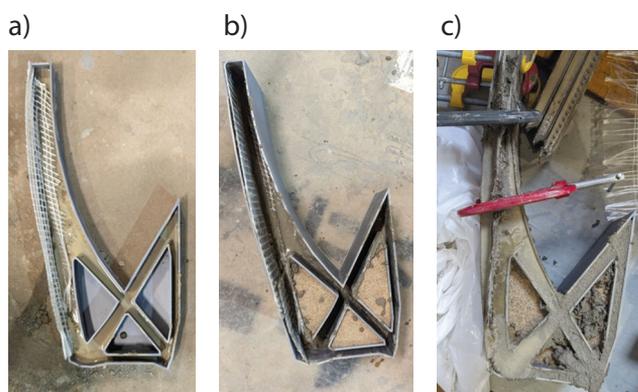


Рис. 5. Изготовление прототипа:

а) укладка бетона первого слоя – консоли и расположение армирования; б) заполнение пустот песком для повышения прочности внутренних стенок опалубки; в) фиксация внешних стенок опалубки после укладки смеси при помощи зажимов (фото авторов)

Fig. 5. Prototype fabrication: a) concrete placement of the first layer – cantilevers and reinforcement layout; b) filling voids with sand to enhance the strength of the formwork's inner walls; c) securing the formwork's outer walls after concrete placement using clamps (authors' photo)

Стандартные конструкции кровли подвергаются постоянной равномерно распределенной нагрузке от собственного веса и временной снеговой нагрузке. При расчетах данная нагрузка замещается эквивалентной распределенной нагрузкой. Очевидно, при использовании консольного покрытия наиболее критическим является случай приложения нагрузки на конец консоли.

При испытаниях нагрузка шла на конец консоли через пластину с целью исключения влияния локальных эффектов (рис. 7a). Реальные опоры, представленные стойками и креплениями трибун, были закреплены. Жесткость опоры обеспечивалась специально разработанным винтовым зажимом, который надежно фиксировал конструкцию. Схема функционирования исходной конструкции предполагала действие растягивающих сил на покрытие и заднюю стенку. Процесс испытания образцов с образованием первых трещин (рис. 7b) и внешним видом образцов (рис. 7c и 7d) представлены ниже.

В результате проведенных испытаний были получены данные о прочностных характеристиках текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа: данные о деформации перемещения свободного края консоли под действием вертикальной нагрузки. Основное внимание уделялось пределу прочности при изгибе и устойчивости конструкции под нагрузкой. Результаты испытаний на изгиб представлены на рис. 8 в виде кривых нагрузка – вертикальное перемещение.

Прототип конструкции был подвергнут равномерной нагрузке на конце консоли, что позволило оценить его способность выдерживать распределенные силы. Максимальная сила разрушения составила около 400 Н, что соответствует напряжению в 4.08 МПа. При этом разрушение произошло в предполагаемом критическом сечении. Полученные значения превышают нормативные показатели для бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза. Это указывает на эффективность конструкции, что соответствует результатам предыдущих исследований [1, 3, 4].

Интересным наблюдением стало восстановление несущей способности конструкции после первичного разрушения. Несмотря на разрушение бетонной матрицы, текстильное армирование продолжило удерживать конструкцию, предотвращая ее полное разрушение. Это говорит о высоком уровне остаточной прочности, что делает такие конструкции особенно перспективными для использования в условиях экстремальных нагрузок, например, в сейсмически активных регионах.



Рис. 6. Образцы конструкции без внешней опалубки через 28 суток (фото авторов)
Fig. 6. Concrete specimens without external formwork after 28 days (authors' photo)

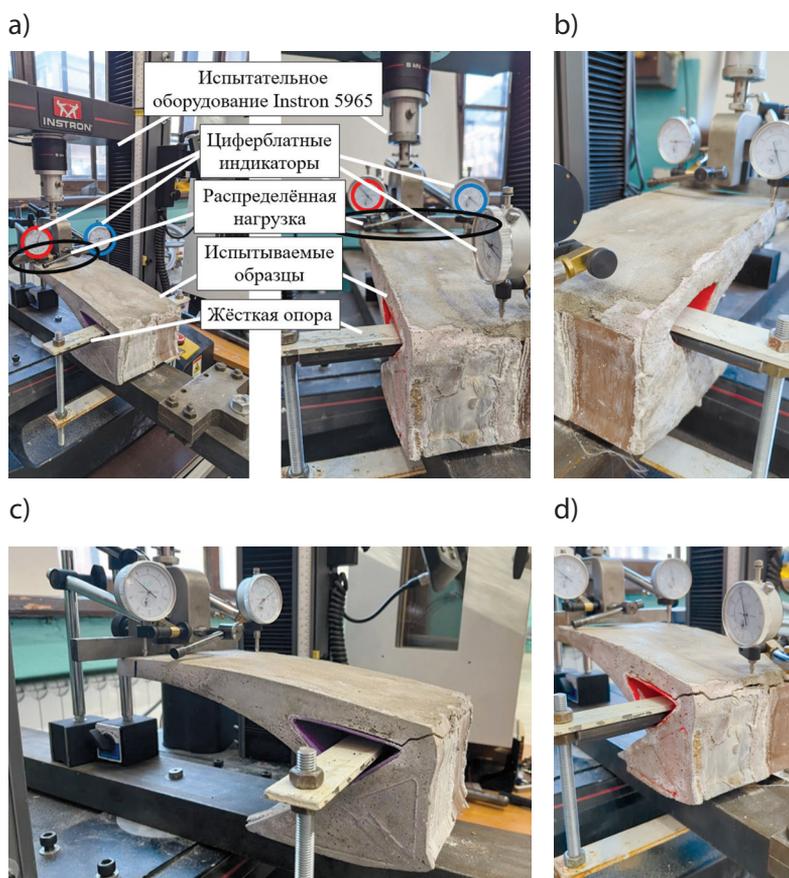


Рис. 7. Испытания образцов на установке Instron 5965 с использованием дополнительной балки, служащей опорой для базы консольной конструкции: а) общий вид; б) образование первой трещины во время испытания образца № 2; с, d) внешний вид образцов № 1 и № 2 соответственно по окончании испытания (фото авторов)
Fig. 7. Specimen testing on Instron 5965 with additional support beam for cantilever base: a) general view; b) first crack formation during test of specimen; c, d) post-test appearance of specimens 1 and 2 (authors' photos)

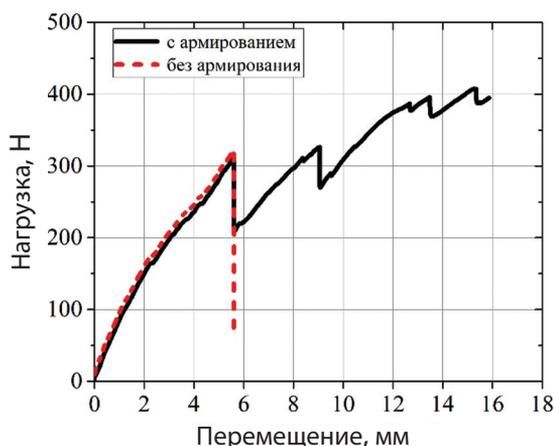


Рис. 8. Зависимость нагрузки от вертикального перемещения армированной конструкции по сравнению с контрольной конструкцией (график составлен авторами)

Fig. 8. Load vs. vertical displacement of reinforced construction compared to control structure (authors' graph)

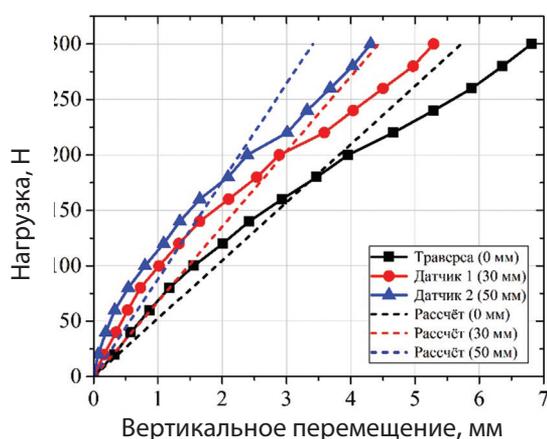


Рис. 9. Зависимость вертикальной силы от перемещения края консоли: перемещение, фиксируемое первым циферблатным индикатором (красный цвет); перемещение, фиксируемое вторым индикатором (синий цвет), перемещение траверсы, передающей распределенную нагрузку (черный цвет) (график составлен авторами)

Fig. 9. Vertical force vs. cantilever edge displacement: displacement measured by dial indicator 1 (red); displacement measured by dial indicator 2 (blue); displacement of load transfer traverse (black) (authors' graph)

Для материалов использовался бетон с модулем упругости 19.4 ГПа и коэффициентом Пуассона 0.141. Конструкция была жестко закреплена по границе основания, а на верхний край поверхности консоли было приложено равномерное линейно-распределенное усилие 400 Н. Результаты расчета нанесены в виде штриховых линий на рис. 9.

Полученные результаты показывают аналогичную эффективность по сравнению с армированием балок, где прирост прочности может достигать 40–85 % [4]. Однако внутренняя текстильная арматура обеспечивает значительное повышение остаточной прочности, что является ее основным преимуществом. Это подтверждает необходимость дальнейших исследований для определения параметров армирования и более эффективного распределения нагрузок в консольных конструкциях.

На основании полученных данных необходимо проведение дальнейших испытаний с целью оптимизации толщины бетонного слоя и увеличения количества армирующих элементов. Это позволит улучшить прочностные характеристики конструкции.

На рис. 9 и 10 представлены графики на основе усредненных экспериментальных данных взаимосвязи прикладываемой нагрузки от фиксируемого вертикального перемещения точек на поверхности конструкции консольного покрытия.

На рис. 10 отображено вертикальное перемещение точек консоли при различной вертикальной нагрузке в зависимости от расстояния от края консоли. В качестве индикаторов взяты точки на краю консоли, а также на расстоянии 30 и 50 мм от края. Предельный допустимый прогиб консоли 2L/120 при длине выноса консоли $L = 332$ мм, черный пунктир по горизонтали соответствует перемещению края консоли на 5.53 мм.

Конечно-элементное моделирование

Конечно-элементный расчет конструкции был выполнен с целью определения напряженно-деформированного состояния под воздействием внешней нагрузки. Модель была создана на основе исходной геометрии конструкции, с использованием тетраэдрических конечных элементов. Средний размер элемента составил 10 мм с более детализированной сеткой (до 2 мм) в местах концентрации нагрузок.

График на рис. 9 показывает нормальную работу конструкций до нагрузки в 300 Н. После этого значения у половины образцов начинали возникать трещины и дальнейшее сравнение с оставшимися целыми образцами не релевантно. При этом близость расчетных данных, отображенных в виде пунктирных линий, и результатов эксперимента показывает верность используемой при расчетах конечноэлементной модели (рис. 11). На рис. 10 продемонстрированы перемещения свободного конца консоли под действием меняющейся с шагом 40 Н вертикальной нагрузки. Из графика следует, что достижение эстетико-психологической границы предельной деформации в 5.53 мм, отражающей предельные состояния второй группы, происходит при нагрузке приблизительно в 260 Н. Это в свою очередь меньше нагрузки в 300 Н, при которой сохраняется нормальная работа, и нагрузки в 400 Н, при которой происходит разрушение. Таким образом, данные эксперимента отображают наличие запаса прочности, который может стать решающим фактором при использовании подобных конструкций в экстремальных условиях.

4. Заключение / Conclusions

1. Проведенные испытания текстильно-армированного бетона для консольных покрытий показали, что максимальная сила разрушения составила около 400 Н, что соответствует напряжению в 4.08 МПа. Это превышает нормативные показатели для бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза, что подтверждает высокую эффективность ТАБ в конструкциях консольного типа.
2. Несмотря на разрушение бетонной матрицы, текстильное армирование продолжало удерживать конструкцию, предотвращая ее полное разрушение. Это демонстрирует высокую остаточную прочность, что делает такие конструкции перспективными для применения в экстремальных условиях, например, в сейсмоактивных регионах.
3. При сравнении с традиционными методами армирования ТАБ показал прирост прочности на 40–85 %, что подтверждает эффективность использования текстильного армирования для повышения прочностных характеристик. Однако для более оптимизированных результатов требуется дальнейшая работа по уточнению параметров армирования.

Для достижения еще более высоких показателей прочности и долговечности рекомендуется провести дополнительные исследования, направленные на оптимизацию толщины бетонного слоя, количества армирующих элементов и шага сетки. В частности, следует проверить возможность уменьшения защитного слоя, что может повлиять на снижение веса конструкции и улучшение экономических показателей.

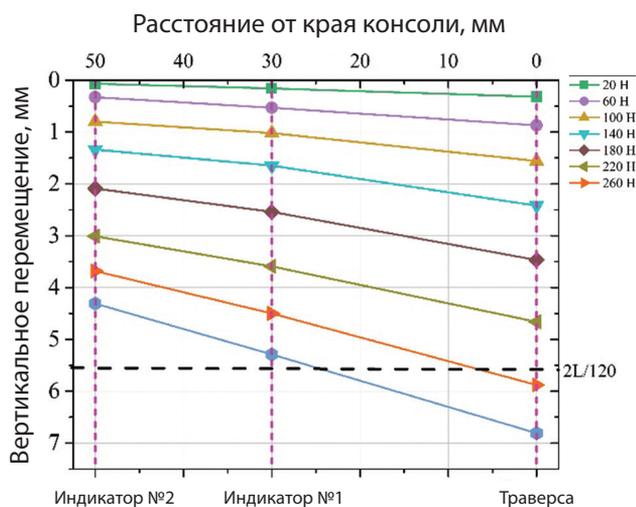


Рис. 10. Зависимость вертикального перемещения точек консоли для различной вертикальной нагрузки (график составлен авторами)

Fig. 10. Vertical displacement of cantilever points vs. vertical load (authors' graph)

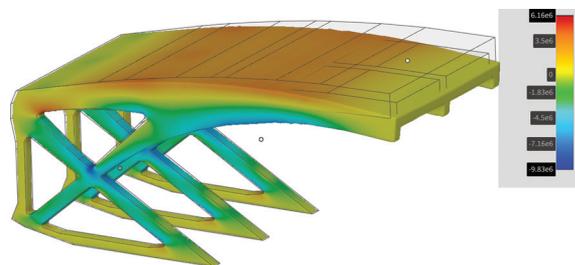


Рис. 11. Конечно-элементное моделирование. Отображаются изополя растягивающих напряжений (модель авторов)

Fig. 11. Finite element modeling. Tensile stress contours shown (authors' model)

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале текстильно-армированного бетона для применения в строительных конструкциях, где важны легкость, долговечность и устойчивость к нагрузкам, а также в экстремальных эксплуатационных условиях, таких как сейсмоактивные регионы.



Вклад авторов. Борисов Н. О.: разработал и провел все основные экспериментальные испытания, выполнил необходимые расчеты, включая конечно-элементное моделирование, а также анализировал полученные данные. Ответственный за инженерное проектирование и изготовление прототипов, выбор компонентов для бетонной смеси и разработку методики испытаний. Столяров О. Н.: принимал участие в подготовке экспериментальных данных, участвовал в анализе механических свойств исследуемых конструкций и подготовке графиков для дальнейшего исследования.

Author contributions. Nikita O. Borisov: designed and conducted all major experimental tests, performed necessary calculations, including finite element modeling, and analyzed the resulting data. Responsible for the engineering design and prototype fabrication, selection of concrete mix components, and development of the testing methodology. Oleg N. Stolyarov: participated in the preparation of experimental data, assisted in the analysis of the mechanical properties of the studied structures, and helped prepare graphs for further investigation.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы / References

1. Kirsanov A. I., Stolyarov O. N. Mechanical properties of synthetic fibers applied to concrete reinforcement. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(4):15–23. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.2>
2. Haas R., Quadflieg T., Stolyarov O. Analysis of reinforcement efficiency and microscopic characterization of glass and carbon roving geometry in prestressed concrete composites. *Journal of Composite Materials*. 2021;55(23):3293–3305. <https://doi.org/10.1177/00219983211013382>
3. Stolyarov O., Quadflieg T., Gries T. Characterization of shear behavior of warp-knitted fabrics applied to composite reinforcement. *The Journal of the Textile Institute*. 2017;108(1):89–94. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1153876>
4. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Influence of the fabric construction parameters and roving type on the tensile property retention of high-performance rovings in warp-knitted reinforced fabrics and cement-based composites. *Journal of Industrial Textiles*. 2017;47(4):453–471. <https://doi.org/10.1177/1528083716652831>
5. Lu W., Lee W. M. W., Xue F., Xu J. Revisiting the effects of prefabrication on construction waste minimization: a quantitative study using bigger data. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;170:105579. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105579>
6. Beckmann B., Bielak Ja., Bosbach S., Scheerer S., Schmidt Ch., Hegger J., Curbach M. Collaborative research on carbon reinforced concrete structures in the CRC/TRR 280 project. *Civil Engineering Design*. 2021;3(3):99–109. <https://doi.org/10.1002/cend.202100017>
7. Janani R., Lalithambigai N. A critical literature review on minimization of material wastes in construction projects. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37(2):3061–3065. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.011>
8. Kortmann J. *Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton = Process engineering investigations into the recyclability of carbon concrete*. Springer Vieweg Wiesbaden; 2020. 249 p. (In Germ.) URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1007/978-3-658-30125-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-30125-5>
9. Rempel S., Will N., Hegger J., Beul P. Filigrane Bauwerke aus Textilbeton = Filigree structures made of textile-reinforced concrete. *Beton- und Stahlbetonbau = Concrete and reinforced concrete construction*. 2015;110(51):83–93. (In Germ.) <http://dx.doi.org/10.1002/best.201400111>
10. Bielak J., Schöneberg J., Classen M., Hegger J. Shear capacity of continuous concrete slabs with CFRP reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2022;320:126117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126117>
11. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104824>
12. Stark A., Classen M., Hegger J. Bond behaviour of CFRP tendons in UHPFRC. *Engineering Structures*. 2019;178(7):148–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.002>
13. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Extrusion and subsequent transformation of textile-reinforced mortar components – requirements on the textile, mortar and process parameters with a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Buildings*. 2022;12(6):726. <https://doi.org/10.3390/buildings12060726>
14. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Investigation into the integration of impregnated glass and carbon textiles in a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Materials*. 2021;14(23):7406. <https://doi.org/10.3390/ma14237406>

15. Alfani R., Guerrini G. L. Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials – A review. *Materials and Structures*. 2005;38(2):239–247. <https://doi.org/10.1007/bf02479349>
16. Perrot A., Rangeard D., Nerella V. N., Mechtcherine V. Extrusion of cement-based materials – An overview. *RILEM Technical Letters*. 2018;3:91–97. <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.75>
17. Li Z., Zhou X. Manufacturing cement-based materials and building products via extrusion: from laboratory to factory. *ICE Proceedings Civil Engineering*. 2015;168(6):11–16. <http://dx.doi.org/10.1680/cien.14.00065>
18. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Investigation of rheological test methods for the suitability of mortars for manufacturing of textile-reinforced concrete using a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Construction Materials*. 2022;2(4):217–233. <https://doi.org/10.3390/constrmater2040015>
19. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014>
20. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M., Hegger J. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Advances in Engineering Software*. 2014;72:119–127. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>
21. Mechtcherine V., Bos F. P., Perrot A., Leal da Silva W. R., Nerella V. N., Fataei S. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*. 2020;132:106037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
22. Mechtcherine V., Nerella V. N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*. 2019;107(3):102933. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
23. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018;112:37–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
24. Classen M., Ungermann J., Sharma R. Additive manufacturing of reinforced concrete – Development of a 3D printing technology for cementitious composites with metallic reinforcement. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3791. <https://doi.org/10.3390/app10113791>
25. Meurer M., Classen M. Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars-development of a consistent experimental characterization strategy. *Materials*. 2021;14(4):752. <https://doi.org/10.3390/ma14040752>
26. Lewis W. J. Chapter 6. Tension cables in suspension bridges. A case of form-finding. In: *Tension Structures*. 2nd edition. ICE Publishing; 2017. P. 101–133. <https://doi.org/10.1680/tsfab.61736.101>
27. Smarslik M., Ahrens M. A., Mark P. Toward holistic tension- or compression-biased structural designs using topology optimization. *Engineering Structures*. 2019;199(8):109632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109632>
28. Stark A., Classen M., Knorrek C., Camps B., Hegger J. Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. *Structural Concrete*. 2018;19(6):1851–1861. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201700288>
29. Hegger J., Herbrand M., Stark A., Classen M. Betonbau der Zukunft: leicht, filigran und nachhaltig/The future of structural concrete: light, filigree and sustainable. *Bauingenieur = Civil Engineer*. 2015;90(07-08):337–344. (In Germ.) <http://dx.doi.org/10.37544/0005-6650-2015-07-08-61>
30. Liew A., López D. L., Van Mele T., Block Ph. Design, fabrication and testing of a prototype, thin-vaulted, unreinforced concrete floor. *Engineering Structures*. 2017;137:323–335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.075>



Информация об авторах

Борисов Никита Олегович, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, borisov.n@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Столяров Олег Николаевич, д-р техн. наук, доцент ВШГиЭ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, stolyarov_on@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Information about the authors

Nikita O. Borisov, Postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, borisov.n@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Oleg N. Stolyarov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, stolyarov_on@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Получена 09 декабря 2024 г., одобрена 01 февраля 2025 г., принята к публикации 14 февраля 2025 г.
Received 09 December 2024, Approved 01 February 2025, Accepted for publication 14 February 2025