

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.97

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34

# 3D печать текстиль-бетонных конструкций

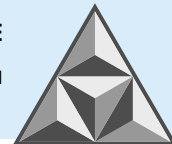
**О.Н. Столяров, А.Е. Донцова, Г.Л. Козинец**

**Олег Николаевич Столяров, Анна Евгеньевна Донцова\*, Галина Леонидовна Козинец**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

*stolyarov\_on@spbstu.ru, anne.dontsoova@ya.ru\*, kozinets\_gl@spbstu.ru*



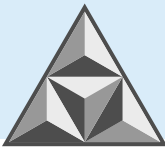
*Предложено технологическое решение по использованию текстильного армирования при возведении стеновых конструкций с применением аддитивных технологий. Данное решение подразумевает предварительное изготовление армирующих каркасов из текстильной армирующей сетки со встроенным слоем внутрисконструкционной теплоизоляции. Используется прочная основовязанная сетка из стекловолокна. Обработка армирующих сеток жидким стеклом повышает прочностные характеристики результирующего композита – текстильно-армированного бетона. Подготовленные каркасы раскладываются на печатаемой конструкции по мере движения сопла строительного 3D принтера. По предложенной технологии изготовлены опытные прототипы элементов стеновых конструкций. Применение армирующей сетки позволяет уменьшить затраты ручного труда на связь внешней и внутренней поверхностей печатаемой стены, дает возможность встраивать в возводимую стену теплоизолирующий материал в ходе печати. Также снижаются требования к бетонной смеси, поскольку армирующая сетка способна играть роль опалубки и предотвращать растекание при печати.*

**Ключевые слова:** 3D-печать, аддитивные технологии, мелкозернистый бетон, несъемная опалубка, текстильно-армированный бетон

**Для цитирования:**

Столяров О.Н., Донцова А.Е., Козинец Г.Л. 3D печать текстиль-бетонных конструкций // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 21-34.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34

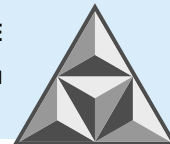
# 3D printing of textile-reinforced concrete

**O.N. Stolyarov, A.E. Dontsova, G.L. Kozinets**

**Oleg Nikolaevich Stolyarov, Anna Evgenyevna Dontsova\*, Galina Leonidovna Kozinets**

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

*stolyarov\_on@spbstu.ru, anne.dontsoova@ya.ru\*, kozinets\_gl@spbstu.ru*



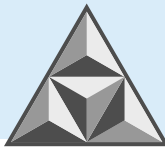
*A paper proposes the technological solution for the use of textile reinforcement with the additive technologies in the construction. This solution involves the preliminary manufacture of reinforcing frames. Those are the textile reinforcing net made of an alkali-resistant basic knitted fiberglass with an integrated layer of wall insulation. The treatment of reinforcing net with liquid glass increases the strength characteristics of the resulting composite – textile reinforced concrete. The technology consists in spreading of the prepared frames on the printed structure as a nozzle of 3D printer moves. The use of reinforcing net allows ones to reduce the manual labour costs for the connection of the external and internal surfaces of the printed wall, makes it possible to embed heat-insulating material into the wall under construction in the printing process. Moreover, the technology reduces the requirements for the concrete mix, since the reinforcing net acts as a formwork and prevents spreading during printing.*

**Keywords:** 3D printing, additive technologies, fine-grained concrete, permanent formwork, textile reinforced concrete

**For citation:**

Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L 3D printing of textile-reinforced concrete // *Smart Composites in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 21-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34



## ВВЕДЕНИЕ

С развитием аддитивных технологий значительно расширился список областей, в которых сокращаются объемы ручного труда. Одним из примеров является технология 3D печати бетона (3DPC – 3D printed concrete). Применение строительного 3D принтера позволяет отказаться от использования опалубки при возведении сооружений. Актуальным вопросом в рамках технологии строительной 3D печати является армирование возводимых конструкций. Армирование текстильными материалами довольно широко распространено при бетонировании, однако в строительной 3D печати представлено лишь отдельными примерами армирования ровингами (нитьями). В настоящей работе разрабатывается технологическое решение по использованию встроенного армирующего каркаса из текстильной сетки для 3D бетонных конструкций. После укладки пространственных армирующих каркасов предполагается заполнение их бетонной смесью, консолидирующей слои конструкции в единое целое.

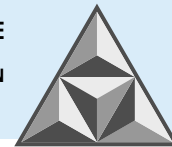
Технологии 3D печати осваиваются и применяются во многих областях и с различными печатными материалами – металлами [1, 2], полимерами [3, 4], биоматериалами [5] и бетоном [6]. Печать металлами и пластиками технологически сходна: материал разогревается до температуры плавления и через сопло подается по заданной траектории. Эта технология освоена в промышленных масштабах и доступна даже обывателям. Строительная 3D печать несколько иная, поскольку бетонная смесь существенно отличается по свойствам от термопластичных материалов. Ввиду этого строительные аддитивные технологии еще должны пройти длительный путь технологического развития.

Основной процесс в любом случае можно описать этапами: проектирование → подготовка модели к печати → загрузка задания на принтер → конструкция. Технологически важным является фактор масштаба. При печати металлами и пластиками габариты печати ограничены размерами стола 3D принтера. При печати строительных конструкций пространство ограничивается размерами конструкции самого 3D принтера и возможностями подачи бетонной смеси. Обычно изготавливаемые строительные конструкции на один-два порядка крупнее изделий, создаваемых классическими 3D принтерами. При этом применение 3D печати в строительстве позволяет повысить энергоэффективность возводимых конструкций за счет изменения внутренней конфигурации стен и заполнения полостей теплоизоляционными материалами [7, 8]. Известны два вида технологий строительной 3D печати: печать частицами с выборочной активацией связующего [9-11] и экструзия бетона [12, 13].

Первая технология подразумевает возведение слоев строительной конструкции из цементно-песчаной смеси и внесение добавок с последующим орошением водой для активации цемента. Форма бетонной конструкции регулируется с помощью изменения мест орошения. Эта технология успешно освоена для заводского изготовления бетонных изделий, однако не подходит для возведения конструкций на строительной площадке с большим числом внешних переменных факторов [14].

Вторая технология подразумевает нанесение бетонной смеси через сопло на основание – плиту или ленточный фундамент и последующее наращивание слоев. Для этого используют строительный 3D принтер, который состоит из внешней рамы, позволяющей печатающей головке перемещаться по площадке, бункеров для хранения сухих составляющих или готовых сухих смесей, системы приготовления и подачи бетонной смеси к печатающей головке, насоса для подачи смеси.

Процесс печати определяется программным кодом или регулируется через панель управления принтером. В ходе печати непрерывно заготавливается бетонная смесь, которая



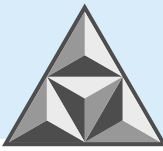
подается в зону печати. Обычно возводимые стеновые конструкции содержат два основных слоя – внешний и внутренний. В межслойном пространстве целесообразно устанавливать ребра жесткости для придания конструкции большей устойчивости. Также это пространство может быть заполнено теплоизоляционным материалом для повышения сопротивления стены теплопередаче или содержать встроенные инженерные системы для водо- и электроснабжения. Выводы инженерных систем из стены в здание закладываются гильзами во время печати или делаются по месту в готовой стене [15]. Закладка коммуникаций параллельно с процессом печати обеспечивает снижение трудозатрат. Дверные и оконные проемы в ходе печати остаются незаполненными, а над проемами монтируют закладные для формирования верхней грани проема.

Строительная 3D печать осуществляется послойным нанесением бетонной смеси на основание и нижележащие слои. Высота напечатанных стен может достигать 3 м; стандартная толщина слоя составляет 20 мм. Бетонная смесь подается через круглое или квадратное сопло. Скорость движения сопла, его размер, форма и расстояние от него до конструкции оказывают наибольшее влияние на характеристики готовой конструкции [16]. Выравнивание стены выполняется сгребавшей насадкой, установленной в задней части сопла. Внешние поверхности напечатанных стен могут быть отделаны финишными материалами. Важным параметром при строительной печати является скорость схватывания слоев: соединение между слоями не должно быть холодным швом бетонирования, но и деформация нижнего слоя под весом верхнего недопустима. Это условие выполняется при наложении слоев в интервале 5-10 мин [17]. Скорость схватывания варьируется в зависимости от погодных условий и может быть отрегулирована путем введения добавок к бетонной смеси.

Хотя применение аддитивных технологий в строительстве является перспективным направлением, на сегодняшний день строительная 3D печать окончательно не освоена. Проблемы связаны с необходимостью динамично регулировать скорость схватывания смеси для достижения требуемой межслойной адгезии и конструктивной прочности элемента. Наличие внешних климатических факторов также осложняет печать по сравнению с традиционной 3D печатью, осуществляемой в условиях статичного внутреннего микроклимата.

На практике предлагаются следующие решения перечисленных проблем: использование быстротсхватывающихся строительных смесей [17] и дисперсного армирования волокнами [18]. Дисперсное армирование хорошо показало себя при печати пластиками [19] и широко используется в традиционном бетонировании. Для дисперсного армирования бетона обычно используют фибру (как синтетическую, так и неорганического происхождения).

Отметим, что в традиционных бетонных работах широко используют несъемную опалубку [20]. Ее применение позволяет уменьшить число технологических операций и, как следствие, повысить скорость строительства. На рынке представлен широкий спектр разновидностей несъемной опалубки, в частности, пенопластовые блоки с пустотами, которые заполняют бетоном. Такие блоки применяет компания Vatiprint 3D: опалубочные блоки вручную устанавливают на подготовленные пазы; после бетонирования конструкцию стены можно описать как «бетон–утеплитель–бетон». В строительной 3D печати использование подобной технологии допускается, с обязательным учетом высоты экструдированного бетонного слоя. Габариты панелей несъемной опалубки должны быть пропорциональны толщине слоев печати. Прочие виды несъемной опалубки принципиально близки, различаясь при этом типом панелей и наличием встроенной арматурной сетки. Также существует сетчатая несъемная опалубка, позволяющая сформировать криволинейные конструкции [20]. Деформируемость такой опалубки делает ее схожей с опалубкой, предлагаемой в настоящей работе.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приведенный выше анализ литературных источников дает возможность представить подходящую опалубочную конструкцию для 3D печати бетоном. Это должна быть многослойная система, подразумевающая наличие слоев бетона снаружи и теплоизоляции внутри стены. Удобной формой теплоизоляционного материала являются готовые плиты или бруски. В существующих технологиях 3D печати также используется указанный формат теплоизоляции, однако закладка изолирующего материала осуществляется вручную, что повышает трудозатраты на проведение процесса. Другая опция – введение во внутрестенное пространство теплоизолирующих гранул или распыление пенного утеплителя, недостатком чего являются узкая распространенность и высокая стоимость, неприемлемые для массового производства. Использование теплоизолирующих плит превращает технологию в универсальную. Предлагаемая конструкция стены представлена на рис 1.

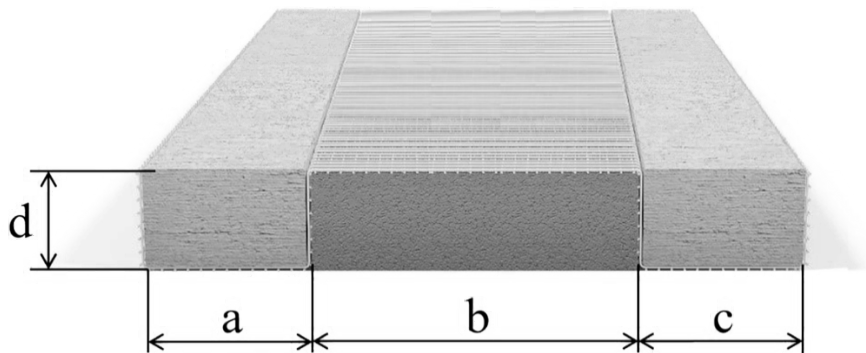


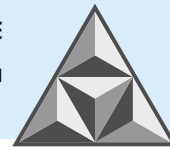
Рис. 1. Модель элемента 3D печатной конструкции

Fig. 1. A model of the 3D-printed wall element

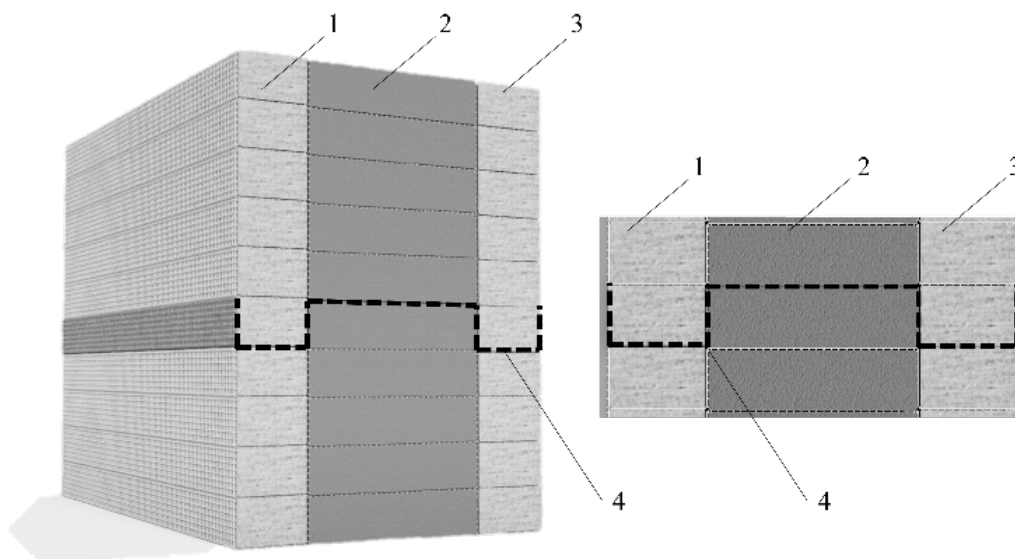
Габариты внутренней ( $a$ ) и наружной ( $c$ ) стен и теплоизоляционного материала ( $b$ ) определяются исходя из требуемой несущей способности стены и ее сопротивления теплопередаче, тогда как высота слоя ( $d$ ) – возможностями строительного 3D принтера. Как уже упомянуто ранее, стандартная толщина слоя при 3D печати бетоном составляет 20 мм. Увеличение этой толщины приводит к повышению нагрузки на нижележащие слои и их деформации. Использование предлагаемой конструкции опалубки позволяет варьировать толщину наносимого слоя бетона, поскольку бортики армирующего каркаса будут предотвращать расползание слоев.

Связь внутреннего и внешнего слоя стены осуществляется через армирующий каркас из текстильной сетки. Концептуально это похоже на металлические скобы, вставляемые при 3D печати вручную для связывания внешнего и внутреннего слоев, однако со снижением трудозатрат. Теплопроводность армирующей сетки ( $0.036 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ) значительно ниже теплопроводности стали, что предотвращает образование мостиков холода в стене.

Для возведения такой стеновой конструкции опалубочный каркас должен быть пространственно-жестким. Он должен включать в себя теплоизолирующий брусок и полые части для последующего заполнения их бетоном. Текстильной сетке можно придать объемную форму и пространственную жесткость за счет нанесения покрытия в деформированном состоянии. Тогда при строительной 3D печати с использованием таких армирующих каркасов технология будет включать этапы: укладка армирующих каркасов по траектории стены; заполнение полостей бетонной смесью. Длину элемента опалубки рационально подбирать в соответствии с типовыми длинами теплоизолирующих плитных материалов. Применение такой опалубки позволит заполнить большой слой возводимой конструкции за один проход



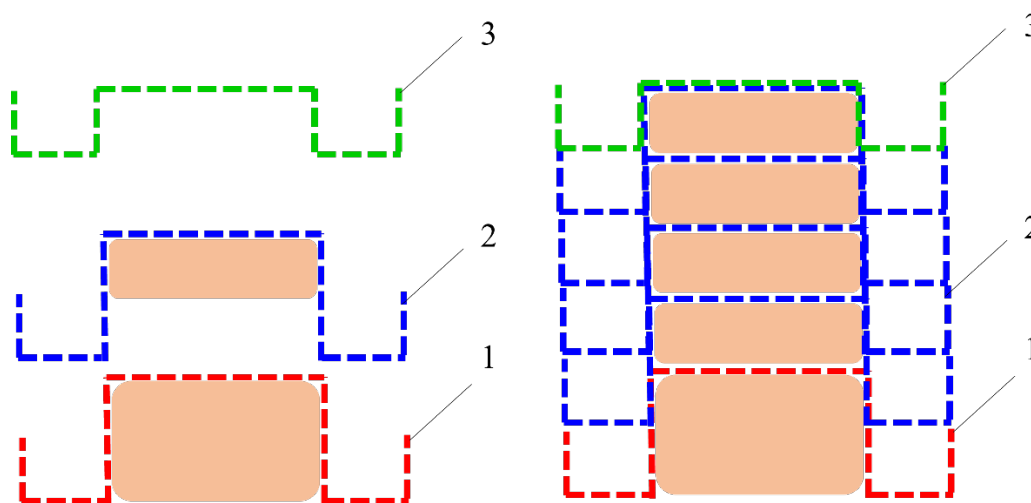
экструдера. После нанесения бетонной смеси может быть уложен следующий слой опалубки. Трехмерная модель стеновой конструкции, которую можно напечатать на 3D принтере с применением таких армирующих каркасов, представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Модель 3D печатной стеновой конструкции: 1 – наружная стена; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – внутренняя стена; 4 – армирующий каркас  
**Fig. 2.** A model of the 3D-printed wall: 1 – external wall; 2 – thermal insulation; 3 – internal wall; 4 – reinforcing framework

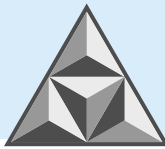
Сетчатая структура армирующего каркаса обеспечивает межслойную адгезию бетона. Это экспериментально подтверждено при испытании балок на изгиб [21, 22]. Предлагаемый прием позволит решить уже упомянутую проблему низкой прочности сцепления вертикальных слоев при печати бетоном.

Конструкция получает дополнительную устойчивость за счет двухуровневой перевязки слоев (рис. 3).



**Рис. 3.** Вариант стеновой конструкции с перевязкой внутренней и наружной стен:  
 1 – начальный элемент опалубки, увеличенный слой теплоизоляции;  
 2 – элемент опалубки; 3 – элемент опалубки без теплоизоляции  
**Fig. 3.** A version of the 3D-printed wall with embedded bracing of wall elements:  
 1 – bottom framework element with enlarged height of thermal insulation;  
 2 – regular framework element; 3 – top framework element without thermal insulation





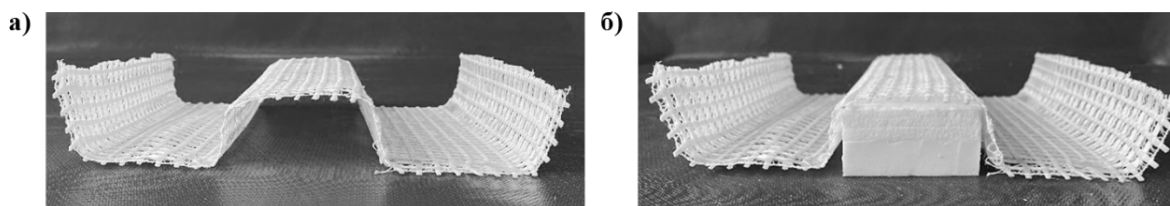
Для возведения стены требуется применить три типа армирующих элементов. Первый тип (1) содержит утолщенный слой теплоизоляции, выступающий на уровень второго слоя печати. Второй тип (2) – рядовой элемент опалубки, содержащий утеплитель, причем на уровень выше, чем полости для бетонной смеси. Третий тип (3) является завершающим и не содержит теплоизолирующего элемента в составе; он устанавливается на верхнем слое стеновой конструкции.

#### *Экспериментальное изготовление прототипа печатной текстиль-бетонной конструкции*

Экспериментально изготовлены образцы несъемной опалубки со встроенным теплоизоляционным слоем. Обычно при текстильном армировании предпочтительно применение углеродных сеток как наиболее прочных и долговечных, однако в данном случае достаточно щелочестойких стеклянных (ЩСС) ровингов. Это экспериментально подтверждено испытаниями на изгиб [21, 22] и сцепление армирующих нитей с бетонной матрицей [23]. Достаточная изгибная прочность обеспечивает совместную работу вертикальных слоев стены, а сцепление текстиля с бетоном гарантирует устойчивость возводимой конструкции.

Существует ряд факторов, которые необходимо учитывать в технологии изготовления несъемной текстильной опалубки для 3D печати. Во-первых, должна обеспечиваться достаточная жесткость проектируемого армирующего каркаса для поддержания устойчивой формы бетонных слоев. Во-вторых, армирующая сетка поставляется в рулонах и легко деформируется. Пространственную жесткость каркасу может придать покрытие жидким стеклом, эпоксидной смолой и другими составами [23]; при этом пропитка жидким стеклом (силикат натрия или калия) наиболее доступна и экономична. Экспериментально установлено, что такая обработка повышает механические характеристики получаемого композита и не увеличивает массу текстильного армирования [23].

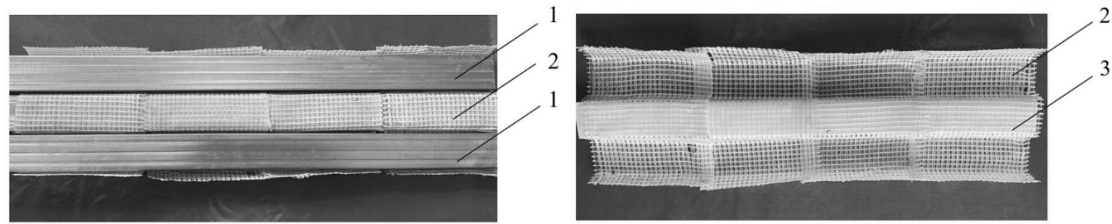
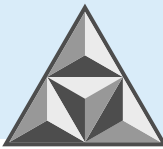
Изготовленный трехмерный образец несъемной опалубки представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Каркас несъемной опалубки из щелочестойкой текстильной сетки:  
*a* – без теплоизоляционного материала; *b* – с теплоизоляционным материалом

**Fig. 4.** A leave-in-place form of alkali-resistant textile:  
*a* – without thermal insulation; *b* – with embedded thermal insulation

Боковые части каркаса заполняли бетонной смесью, а в центральной его части помещали теплоизоляционный материал. Каркас был обработан жидким стеклом для сохранения пространственной формы. Размер армирующего каркаса зависит от ширины текстильной сетки и может варьироваться в зависимости от толщины слоев стены. Представленный армирующий каркас технологически доступен и универсален. Подготовка каркасов может происходить как вне строительной площадки, так и непосредственно на ней перед печатью конструкции. Процесс изготовления армирующих каркасов показан на рис. 5.



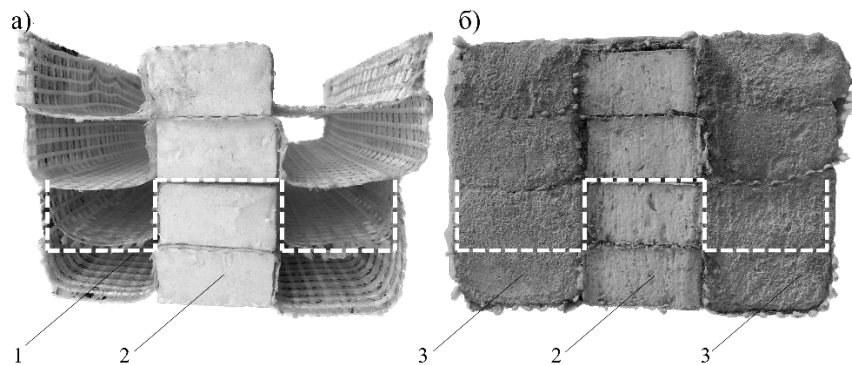
**Рис. 5.** Процесс изготовления каркаса несъемной опалубки из щелочестойкого текстиля:  
1 – оснастка для изготовления армирующего каркаса; 2 – армирующий каркас;  
3 – теплоизоляционный материал

**Fig. 5.** A preparation of the leave-in-place form of alkali-resistant textile:  
1 – accessory equipment; 2 – reinforcing textile; 3 – insulation

Для придания каркасам пространственной формы используются П-образные профили, на которые укладывают армирующую сетку. Центральный профиль, играющий роль теплоизоляционной панели, накрывается сеткой, а на нее укладывают крайние профили. Деформированная сетка покрывается жидким стеклом. При высокой подвижности исходной сетки она может быть дополнительно прикреплена к профилям на время твердения. При использовании длинных профилей несколько армирующих сетчатых элементов могут готовиться параллельно. После придания сетке пространственной жесткости в каркас устанавливают теплоизоляционный материал, как это показано выше на рис. 4, б. В случае высокой жесткости теплоизолирующих панелей они могут быть установлены в армирующий каркас еще на этапе его формирования. Тогда покрытие армирующего каркаса приклеит теплоизолирующую панель к сетке каркаса. Для создания длинных армирующих каркасов армирующая сетка может укладываться внахлест в местах стыков (см. рис. 5, б.)

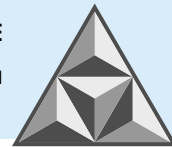
В ходе печати армирующие каркасы укладываются по контуру изготавливаемой стены, после чего 3D принтер заполняет ячейки бетонной смесью. После прохода экструдера вручную выкладываются армирующие каркасы второго слоя, затем осуществляется проход для формирования нового слоя. Описанный алгоритм повторяется, пока стена не достигнет проектной высоты. В предлагаемых армирующих каркасах присутствует как горизонтальное, так и вертикальное армирование. В рамках укладки армирующих каркасов рабочий проверяет напечатанный слой и, при необходимости, корректирует ход печати. Укладка армирующих каркасов является менее трудозатратной, чем установка армирующих металлических скоб.

Относительное положение каркасов без бетона показано на рис. 6, а. Фрагмент готовой стены представлен на рис. 6, б.



**Рис. 6.** Принцип формирования стеновой конструкции из несъемной опалубки:  
1 – армирующий каркас; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – бетон;  
а – каркас стены без бетона; б – готовая стеновая конструкция

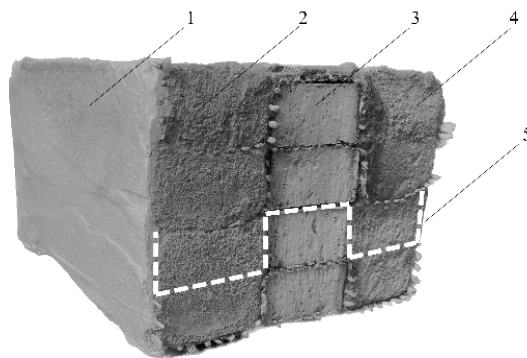
**Fig. 6.** A concept of the 3D-printed wall with leave-in-place form:  
1 – reinforcing textile formwork; 2 – thermal insulation; 3 – concrete  
а – framed wall without concrete; б – built-up wall structure



Каркас, соответствующий одному слою печатной конструкции, показан белым пунктиром. Экструзию бетона производили по питающей трубе на экспериментальном стенде под действием силы тяжести, без применения насоса и полноценного строительного 3D принтера.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовленная стеновая конструкция является готовым к эксплуатации строительным изделием. Качество поверхности внешней и внутренней граней может быть улучшено за счет подбора оптимальной бетонной смеси и изготовления армирующих каркасов. В этом случае поверхность оставляют без дополнительной отделки. Если же планируется оштукатуривание напечатанной стены, ячеистая структура внешней армирующей сетки, играющей роль бортиков каркаса, обеспечит повышение адгезии штукатурной смеси. Изготовленный фрагмент стены с черновым штукатурным покрытием показан на рис. 7.

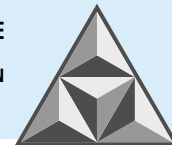


**Рис. 7.** Готовая стеновая конструкция: 1 – отделка; 2 – наружная стена; 3 – теплоизоляционный материал; 4 – внутренняя стена; 5 – армирующий каркас  
**Fig. 7.** A built-up wall structure: 1 – finishing; 2 – external wall; 3 – thermal insulation; 4 – internal wall; 5 – reinforcing framework

Предлагаемые армирующие каркасы упрощают технологию 3D печати бетоном. Кроме того, применение армирующих каркасов разрешает одну из центральных проблем строительной 3D печати – деформацию нижележащих слоев под давлением верхних. Каркас из текстильной сетки придает слою пространственные границы, позволяя снизить требования к скорости схватывания бетонной смеси. При этом возводимая конструкция содержит встроенную теплоизоляцию, и собственный вес ее легче по сравнению с традиционными монолитными строительными изделиями. Применение 3D печати бетоном совместно с пространственными армирующими каркасами приведет к сокращению временных затрат на строительство, а также повышению гибкости и адаптивности проектных решений.

## ВЫВОДЫ

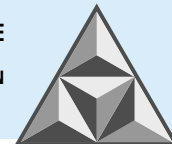
Показана возможность использования в 3D строительных конструкциях текстильного армирования; при этом пространственный армирующий каркас из текстильной сетки одновременно является опалубочным элементом. Существенные ограничения в форме создаваемых каркасов отсутствуют, так как текстильная сетка подвижна. Наличие в каркасе пустот для внешнего и внутреннего слоя бетона обеспечивает перевязку слоев печатной стены в горизонтальном направлении.



Наличие борозд в армирующем каркасе предотвращает растекание нижних слоев конструкции. Многофункциональность предлагаемого каркаса позволяет сократить затраты на строительное производство методом 3D печати. Каркас с предварительно заполненными бетоном полостями может использоваться для перемычек над дверными и оконными проемами, обеспечивая связность и однородность конструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Buchanan C., Gardner L.** Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // *Engineering Structures*. 2019. № 180. P. 332-348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
2. **Kanyilmaz A., Demir A.G., Chierici M., Berto F., Gardner L., Kandukuri S.Y., Kassabian P., Kinoshita T., Laurenti A., Paoletti I., du Plessis A., Razavi N.** Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector // *Additive Manufacturing*. 2022. № 50. P. 102541. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102541.
3. **Bedarf P., Dutto A., Zanini M., Dillenburger B.** Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes. *Automation in Construction*. 2021. № 130. P. 103861. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103861.
4. **Singh S., Ramakrishna S. Berto F.** 3D Printing of polymer composites: A short review // *Material Design & Processing Communications*. 2020. № 2 (2). DOI: 10.1002/mdp2.97.
5. **Vanaei S., Parizi M.S., Vanaei S., Salemizadehparizi F., Vanaei, H.R.** An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application // *Engineered Regeneration*. 2021. № 2. P. 1-18. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.12.001.
6. **Клюев С.В., Клюев А.В., Шорстова Е.С.** Фибробетон для 3D аддитивных технологий // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 14-20.
7. **Khan M. S., Sanchez F., Zhou H.** 3D-printing of concrete: Beyond horizons // *Cement and Concrete Research*. 2020. №. 33. pp. 106070. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106070.
8. **Nemova D., Kotov E., Andreeva D., Khorobrov S., Olshevskiy V., Vasileva I., Zaborova D., Musorina T.** Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures // *Energies*. 2022. № 15 (12). P. 4230. DOI: 10.3390/en15124230.
9. **Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L.** Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders // *Construction and Building Materials*. 2015. № 93. P. 486-497. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132.
10. **Lowke D., Dini E., Perro, A., Weger D., Gehlen C., Dillenburger B.** Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 112. P. 50-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
11. **Ingaglio J., Fox J., Naito C.J., Bocchini P.** Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates // *Construction and Building Materials*. 2019. № 206. P. 494-503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.065.
12. **Hou S., Duan Z., Xiao J., Ye J.** A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design // *Construction and Building Materials*. 2021. № 273. P. 121745. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
13. **Şahin H.G., Mardani A.** Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state-of-the-art review // *Structural Concrete*. 2023. № 24 (4). P. 5481-5505. DOI: 10.1002/suco.202200473.
14. **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. P. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
15. **García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P.** Architectural evaluation of 3d-printed buildings // *Buildings*. 2021. № 11 (6). pp. 254. DOI: 10.3390/buildings11060254.
16. **Yang L., Sepasgozar S. M. E., Shirowzhan S., Kashani A., Edwards D.** Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete // *Automation in Construction*. 2023. № 146. P. 104671. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104671.



17. **Xu Y., Yuan Q., Li Z., Shi C., Wu Q., Huang Y.** Correlation of interlayer properties and rheological behaviors of 3DPC with various printing time intervals // *Additive Manufacturing*. 2021. № 47. P. 102327. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102327.
18. **Ramezani A., Modaresi S., Dashti P., GivKashi M. R., Moodi F., Ramezaniapour A.A.** Effects of Different Types of Fibers on Fresh and Hardened Properties of Cement and Geopolymer-Based 3D Printed Mixtures: A Review // *Buildings*. 2023. № 13 (4). P. 945. DOI: 10.3390/buildings13040945.
19. **Liu D., Zhang Z., Zhang X., Chen Z.** 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities // *Construction and Building Materials*. 2023. № 405. P. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364.
20. **Li W., Lin X., Bao D.W., Min Xie Y.** A review of formwork systems for modern concrete construction // *Structures*. 2022. № 38. P. 52-63. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089.
21. **Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov S.G., Melnikov B.E.** Structure and properties of textile reinforced concrete // *Journal of Civil Engineering*. 2015. № 59 (7). P. 50-56. DOI: 10.5862/MCE.59.5. URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2015.59.5> (дата обращения: 10.10.2024).
22. **Volkova A., Paykov A., Semenov S., Stolyarov O., Melnikov B.** Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 53. P. 01016. DOI: 10.1051/mateccconf/20165301016.
23. **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). P. 2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003.

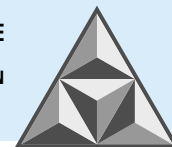
Поступила в редакцию 22.08.2024

Одобрена после рецензирования 17.09.2024

Принята к опубликованию 10.12.2024

## REFERENCES

1. **Buchanan, C. and Gardner, L.** (2019), "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges", *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 332-348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
2. **Kanyilmaz, A., Demir, A.G., Chierici, M., Berto, F., Gardner, L., Kandukuri, S. Y., Kassabian, P., Kinoshita, T., Laurenti, A., Paoletti, I., du Plessis, A. and Razavi, N.** (2022), "Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector", *Additive Manufacturing*, vol. 50, p. 102541. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102541.
3. **Bedarf, P., Dutto, A., Zanini, M. and Dillenburger, B.** (2021), "Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes", *Automation in Construction*, vol. 130, p. 103861. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103861.
4. **Singh, S., Ramakrishna, S. and Berto, F.** (2020), "3D Printing of polymer composites: A short review", *Material Design & Processing Communications*, vol. 2, no. 2. DOI: 10.1002/mdp2.97.
5. **Vanaei, S., Parizi, M. S., Vanaei, S., Salemizadehparizi, F. and Vanaei, H.R.** (2021), "An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application", *Engineered Regeneration*, vol. 2, pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.12.001.
6. **Klyuyev, S.V., Klyuev, A. V. and Shorstova, E.S.** (2019), "Fiber concrete for 3D-printing", *Stroitel'nye materialy i izdeliya [Construction materials and products]*, vol. 4, no. 2, pp. 14-20 (In Russian).
7. **Khan, M.S., Sanchez, F. and Zhou, H.** (2020), "3D printing of concrete: Beyond horizons", *Cement and Concrete Research*, no. 133. p. 106070. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106070.
8. **Nemova, D., Kotov, E., Andreeva, D., Khorobrov, S., Olshevsky, V., Vasileva, I., Zaborova D. and Musorina, T.** (2022), "Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures", *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4230. DOI: 10.3390/en15124230.
9. **Feng, P., Meng, X., Chen, J. F. and Ye, L.** (2015), "Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders", *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 486-497. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132.



10. **Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen C. and Dillenburger, B.** (2018), "Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges", *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 50-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
11. **Ingaglio, J., Fox, J., Naito, C. J. and Bocchini, P.** (2019), "Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 206, pp. 494-503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.065.
12. **Hou, S., Duan, Z., Xiao, J. and Ye, J.** (2021), "A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design", *Construction and Building Materials*, vol. 273, p. 121745. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
13. **Şahin, H.G. and Mardani, A.** (2023), "Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state-of-the-art review", *Structural Concrete*, vol. 24, no. 4, pp. 5481-5505. DOI: 10.1002/suco.202200473.
14. **Buswell, R.A., Leal, de Silva W.R., Jones, S.Z. and Dirrenberger, J.** (2018), "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research", *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
15. **García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. and Banda-Pérez, P.** (2021), "Architectural evaluation of 3d-printed buildings", *Buildings*, vol. 11, no. 6, p. 254. DOI: 10.3390/buildings11060254.
16. **Yang, L., Sepasgozar, S. M. E., Shirowzhan, S., Kashani, A. and Edwards, D.** (2023), "Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete", *Automation in Construction*, vol. 146, p. 104671. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104671.
17. **Xu, Y., Yuan, Q., Li, Z., Shi, C., Wu, Q. and Huang, Y.** (2021), "Correlation of interlayer properties and rheological behaviors of 3DPC with various printing time intervals", *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102327. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102327.
18. **Ramezani, A., Modares, S., Dashti, P., GivKashi, M.R., Moodi, F. and Ramezani-pour, A.A.** (2023), "Effects of Different Types of Fibers on Fresh and Hardened Properties of Cement and Geopolymer-Based 3D Printed Mixtures: A Review", *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 945. DOI: 10.3390/buildings13040945.
19. **Liu, D., Zhang, Z., Zhang, X. and Chen, Z.** (2023), "3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities", *Construction and Building Materials*, vol. 405, p. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364.
20. **Li, W., Lin, X., Bao, D.W. and Min Xie, Y.** (2022), "A review of formwork systems for modern concrete construction". *Structures*, vol. 38, pp. 52-63. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089.
21. **Volkova, A.A., Paykov, A.V., Stolyarov, O.N., Semenov, S.G. and Melnikov, B.E.** (2015), "Structure and properties of textile reinforced concrete", *Magazine of Civil Engineering*, vol. 59, no. 7, pp. 50-56. DOI: 10.5862/MCE.59.5.
22. **Volkova, A., Paykov, A., Semenov, S., Stolyarov, O. and Melnikov, B.** (2016), "Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete", *MATEC Web of Conferences*, vol. 53, p. 01016. DOI: 10.1051/matecconf/20165301016.
23. **Quadflieg, T., Leimbrink, S., Gries, T. and Stolyarov, O.** (2018) "Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 52, no. 19, pp. 2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003.

Received 22.08.2024

Approved 17.09.2024

Accepted 10.12.2024