

УДК 69.002.5

## МЕТОДЫ АРМИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ ВОЗВЕДЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА

А. Н. Парфиевич<sup>1</sup>, Н. Н. Черкасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, проректор по учебной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfievichand@gmail.com

<sup>2</sup> Инженер-конструктор, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Солигорск, Беларусь; преподаватель кафедры технологии и оборудование разработки месторождений полезных ископаемых, филиал Белорусский национальный технический университет, Солигорск, Беларусь, e-mail: tcherkasow1996@gmail.com

### Реферат

Технология 3D-печати строительными материалами, особенно бетоном, активно внедряется в строительство благодаря высокой скорости возведения, снижению трудозатрат и возможности реализации сложных архитектурных форм [5, 6]. Однако ключевой проблемой остаётся недостаточная прочность и долговечность печатных конструкций, вызванная их слоистой структурой и слабой устойчивостью к растягивающим и изгибающим нагрузкам [7, 8]. Армирование в этом контексте становится необходимым для повышения структурной надёжности.

В работе проведён анализ существующих методов армирования 3D-печатных конструкций: внутреннего (встраивание арматуры в тело бетона), внешнего (последующее нанесение армирующих элементов) и интегрированного (армирование в процессе печати). Особое внимание уделено инновационной технологии – использованию стержневого армировщика, интегрированного в 3D-принтер. Такое решение позволяет автоматически укладывать арматурные стержни непосредственно в свежесложенный бетонный слой, обеспечивая их точное позиционирование и надёжное сцепление с материалом.

Преимущества данной технологии включают: повышение точности армирования, увеличение прочности конструкций, сокращение времени и трудозатрат, а также улучшение энергоэффективности процесса. Кроме того, перспективным направлением является применение композитной арматуры, обладающей высокой коррозионной стойкостью и малым весом, что расширяет возможности эксплуатации 3D-печатных зданий в агрессивных средах.

Внедрение интегрированных стержневых армировщиков способствует трансформации строительной отрасли, приближая её к полной цифровизации и массовому использованию аддитивных технологий. Это открывает путь к созданию более прочных, долговечных и экономически эффективных конструкций, ускоряя переход к инновационному строительству будущего.

**Ключевые слова:** 3D-печать бетона, армирование, внутреннее армирование, внешнее армирование, интегрированное армирование, стержневой армировщик, строительный 3D-принтер, автоматизация строительства.

## METHODS OF REINFORCEMENT OF BUILDING STRUCTURES DURING THEIR CONSTRUCTION USING A 3D PRINTER

A. N. Parfievich, N. N. Cherkasov

### Abstract

Concrete 3D printing technology is actively being introduced into construction due to its high construction speed, reduced labor costs, and the ability to create complex architectural forms [5, 6]. However, a key challenge remains the insufficient strength and durability of printed structures, caused by their layered structure and low resistance to tensile and bending loads [7, 8]. In this context, reinforcement becomes essential to enhance structural reliability.

This study presents an analysis of existing reinforcement methods for 3D-printed structures: internal (embedding reinforcement within the concrete matrix), external (applying reinforcing elements after printing), and integrated (reinforcement during the printing process). Special attention is given to an innovative technology – the use of a rod-feeding reinforcement unit integrated directly into the 3D printer. This solution enables automatic placement of reinforcing bars directly into the freshly deposited concrete layer, ensuring precise positioning and strong bond with the material.

The advantages of this technology include improved reinforcement accuracy, increased structural strength, reduced time and labor costs, and enhanced energy efficiency. Furthermore, the use of composite reinforcement materials is a promising direction, offering high corrosion resistance and low weight, thereby expanding the applicability of 3D-printed buildings in aggressive environments.

The integration of automated rod-reinforcement systems promotes the transformation of the construction industry, advancing full digitalization and widespread adoption of additive manufacturing. This paves the way for stronger, more durable, and economically efficient structures, accelerating the transition towards innovative construction of the future.

**Keywords:** concrete 3D printing, reinforcement, internal reinforcement, external reinforcement, integrated reinforcement, rod-reinforcement unit, construction 3D printer, construction automation.

### Введение

Аддитивные технологии, в частности 3D-печать бетоном, представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в современном строительстве. Их применение позволяет реализовывать сложные геометрические формы, сокращать сроки строительства и минимизировать отходы материалов [5, 6]. Однако, несмотря на очевидные преимущества, напечатанные конструкции характеризуются анизотропными механическими свойствами, вызванными слоистой структурой, что снижает их устойчивость к растяжению, изгибу и динамическим нагрузкам по сравнению с традиционным монолитным бетоном [7, 8].

Для повышения несущей способности и долговечности 3D-печатных конструкций необходимы эффективные методы армирова-

ния. Традиционные подходы, такие как установка арматурного каркаса, плохо совместимы с аддитивными процессами из-за ограничений подвижности печатающей головки и необходимости непрерывности процесса [10, 11]. В связи с этим актуальными становятся разработка и внедрение инновационных решений, позволяющих интегрировать армирование непосредственно в процесс 3D-печати.

### 1 Методы армирования 3D-печатных строительных конструкций: сравнительный анализ и систематизация

Аддитивные технологии в строительстве, в особенности 3D-печать бетоном, демонстрируют значительный потенциал в контексте цифровизации отрасли. Однако их широкое внедрение сдерживается проблемой обеспечения достаточной прочности и долговеч-

ности напечатанных конструкций. Основная причина – анизотропная структура материала, формируемая послойным нанесением бетонной смеси, что приводит к ослабленным межслойным границам и пониженной устойчивости к растягивающим и изгибающим нагрузкам по сравнению с монолитным бетоном [7, 8].

В этих условиях армирование выступает не просто усилительным элементом, а структурно необходимым компонентом, определяющим пригодность 3D-печатных конструкций к эксплуатации в реальных условиях. В зависимости от технологической интеграции и временного контекста внедрения армирующих элементов, все существующие методы можно систематизировать на три группы: внутреннее, внешнее и интегрированное армирование. Каждый из них обладает своими преимуществами, ограничениями и сферами рационального применения.

### 1.1 Внутреннее армирование: потенциал и технологические барьеры

Внутреннее армирование предполагает размещение армирующих элементов в процессе печати, непосредственно между или внутри слоев свежеуложенного бетона. Наиболее распространённые реализации включают:

- синхронизированную работу роботизированной руки и 3D-принтера для укладки арматуры в заданные позиции [10];
- подачу армирующих волокон или прутков через модифицированную печатающую головку [9].

Этот подход обеспечивает высокую степень интеграции арматуры в несущую структуру, что позволяет достичь значительного повышения прочности на изгиб и растяжение. Кроме того, он открывает возможности для создания оптимизированных, биомиметических конструкций с переменной жёсткостью, недоступных при традиционных методах [6, 11].

Однако анализ показывает, что внутреннее армирование сталкивается с рядом фундаментальных ограничений:

- технологическая несовместимость с высокоскоростной экструзией: роботизированная укладка арматуры требует остановки или замедления процесса печати, что снижает общую производительность;
- сложность синхронизации нескольких систем (принтер + армирующее устройство), что увеличивает риск ошибок и дефектов;
- ограниченная гибкость в выборе типов арматуры: большинство решений ориентированы на проволоку или волокна, а не на стержневую арматуру, обеспечивающую жёсткую пространственную связь.

Таким образом, несмотря на высокий потенциал, внутреннее армирование в его текущей форме не обеспечивает достаточной степени автоматизации и масштабируемости для массового строительства.

### 1.2 Внешнее армирование: надёжность за счёт компромисса

Внешнее армирование реализуется после завершения процесса печати и включает нанесение или крепление армирующих материалов на поверхность конструкции. К ним относятся:

- композитные оболочки (углеродное, стекловолокно) с полимерным связующим [13];
- установка стальных сеток или каркасов с последующим омоноличиванием [16].

Преимущества данного метода заключаются:

- в высокой адаптивности к различным условиям нагружения и климатическим воздействиям;
- возможности усиления уже построенных объектов;
- использовании проверенных и нормированных материалов.

Однако внешнее армирование имеет существенные недостатки:

- увеличение сроков строительства за счёт необходимости дополнительных технологических операций;
- зависимость от квалификации рабочих, что снижает воспроизводимость результатов;
- повышенные трудозатраты и стоимость по сравнению с интегрированными решениями.

Следовательно, внешнее армирование целесообразно применять в случаях, когда внутреннее армирование невозможно или недостаточно, но оно противоречит основной философии 3D-печати – минимизации ручного труда и ускорению строительства.

### 1.3 Интегрированное армирование: путь к цифровизации

Интегрированное армирование представляет собой наиболее перспективное направление, поскольку оно сочетает преимущества автоматизации, точности и структурной эффективности.

Ключевые подходы:

1. Фибробетон – использование бетонной смеси, модифицированной дисперсными волокнами (стальными, полимерными, углеродными) [9, 11]. Обеспечивает равномерное распределение армирования, но не решает проблему межслойной прочности и не формирует жёсткую пространственную сеть.

2. Автоматизированная укладка стержневой арматуры – внедрение прутков в свежий слой бетона с помощью специализированного устройства, интегрированного в 3D-принтер [10, 12].

Анализ показывает, что именно стержневое армирование является наиболее эффективным решением для обеспечения структурной целостности 3D-печатных конструкций. Оно позволяет:

- формировать жёсткую пространственную сеть, аналогичную традиционному арматурному каркасу;
- обеспечивать высокую межслойную связь за счёт механического анкерования;
- реализовывать переменную плотность армирования в зависимости от расчётных напряжений.

## 2 Автоматизированное стержневое армирование: анализ преимуществ и перспектив

Внедрение стержневого армировщика как неотъемлемого элемента строительного 3D-принтера знаменует переход от полуавтоматических решений к полностью цифровому и автоматизированному строительству. Рассмотрим его преимущества в сравнительном контексте.

### 2.1 Повышение структурной надёжности

Основная проблема 3D-печатных конструкций – слабые межслойные связи. Стержневое армирование решает эту задачу за счёт сквозного армирования, когда прутки проходят через несколько слоев, обеспечивая механическое сцепление и предотвращая расслаивание. Это особенно важно для вертикальных конструкций, подверженных изгибающим моментам и сейсмическим нагрузкам [12].

### 2.2 Высокая степень автоматизации и воспроизводимость

В отличие от ручного или полуавтоматического армирования, стержневой армировщик:

- полностью исключает человеческий фактор;
- обеспечивает точность укладки  $\pm 1-2$  мм, что критично для соблюдения проектных решений;
- позволяет интегрировать схемы армирования непосредственно в CAD/BIM-модель, обеспечивая сквозное цифровое сопровождение проекта [10].

### 2.3 Оптимизация расхода материалов и снижение массы конструкции

Одно из ключевых преимуществ – возможность адаптивного армирования. В зонах с высокими напряжениями (например, в углах, опорах, местах примыкания перекрытий) плотность армирования увеличивается, а в менее нагруженных участках – снижается. Это позволяет:

- сократить расход арматуры на 15–30 % по сравнению с равномерным армированием;
- уменьшить общий вес конструкции, что особенно важно при строительстве на слабых грунтах или в сейсмоопасных районах [14, 15].

### 2.4 Совместимость с композитными материалами

Современные стержневые армировщики способны работать с композитной арматурой на основе базальтового или углеродного волокна, которая обладает:

- высокой прочностью при растяжении;
- коррозионной стойкостью;
- низкой теплопроводностью (исключает образование «мостиков холода») [4].

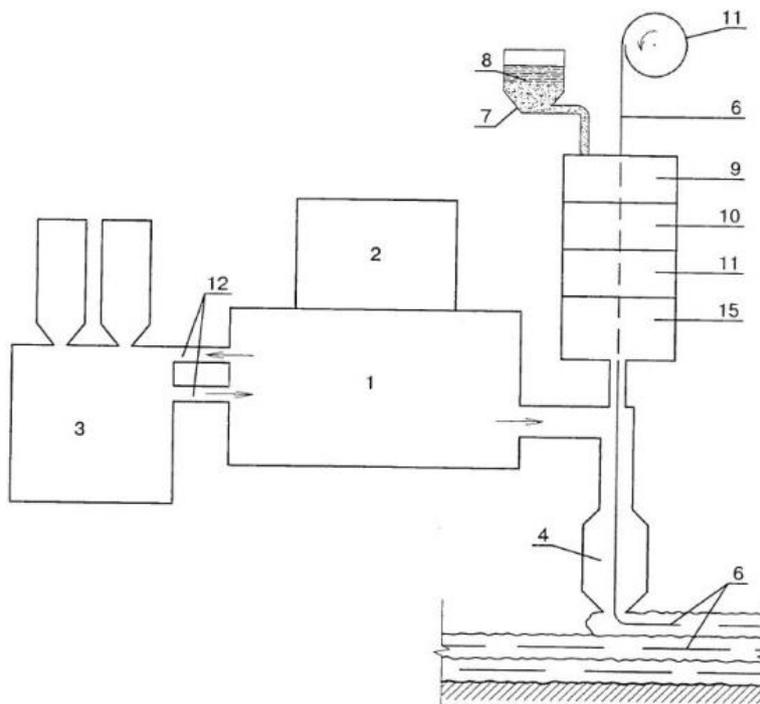
Это открывает путь к созданию долговечных, энергоэффективных и устойчивых к агрессивным средам конструкций, что особенно актуально для промышленного и инфраструктурного строительства [17–20].

### 3 Перспективы и вызовы внедрения

На современном этапе разработаны различные технические решения, направленные на интеграцию армирования в процесс 3D-печати.

#### 3.1 Устройство с канатной арматурой [2]

Устройство включает узел подачи волоконных канатов, интегрированный в раздаточную головку принтера (рисунок 1).



1 – управляющая система; 2 – бетоносмесительный узел; 3 – бетононасосный узел; 4 – раздаточная головка; 5 – картридж; 6 – волоконные канаты; 7 – емкость; 8 – связующее; 9 – смесительная ванна; 10 – термофилье; 11 – подающее устройство; 12 – трубопровод; 13 – бетонная смесь; 15 – ножницы

Рисунок 1 – Схема устройства для возведения монолитного здания [2]

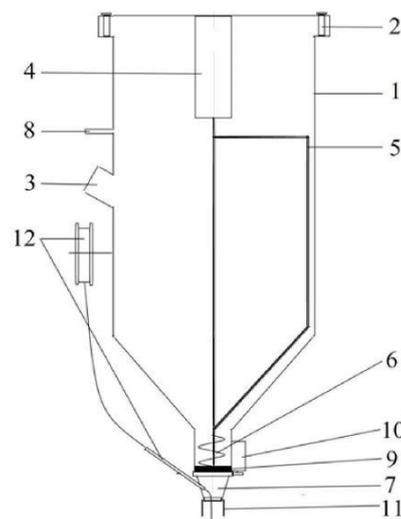
Недостатки:

- высокая стоимость и ограниченная доступность канатов;
- отсутствие жёсткой связи между параллельными стенками;
- риск самопроизвольного вытекания смеси из-за отсутствия запорного клапана.

#### 3.2 Экструдер с подмешивающим устройством [3]

Экструдер оснащён дозатором, подмешивающей рамкой и возможностью подачи пластификаторов (рисунок 2).

Недостаток: отсутствие межслойной жёсткой связи, что снижает прочность конструкции.



1 – ёмкость (корпус) экструдера; 2 – устройство крепления; 3 – отверстие для загрузки (подачи) в экструдер строительного материала (строительной смеси); 4 – привод дозатора и подмешивающей рамки; 5 – подмешивающая рамка; 6 – дозатор (шнек или героторная пара); 7 – сопло; 8 – штуцер (коммуникации) для подачи пластифицирующих и иных добавок к строительной смеси; 9 – запорный клапан; 10 – привод поворотной оси для поворота сопла и устройства формирования поверхности в виде заглаживающих либо фактурных лопаток по направлению движения печатающей головки; 11 – устройство формирования поверхности в виде заглаживающих либо фактурных лопаток; 12 – устройство для укладки арматуры, представляющее из себя привод

Рисунок 2 – Экструдера строительных смесей для 3D-принтера [3]

#### 3.3 Прутковый армировщик с независимыми бункерами [4] (рисунок 3)

Разработанное устройство включает четыре независимых бункера с механизмами подачи композитных прутков, укладываемых между слоями под углом друг к другу.

Преимущества:

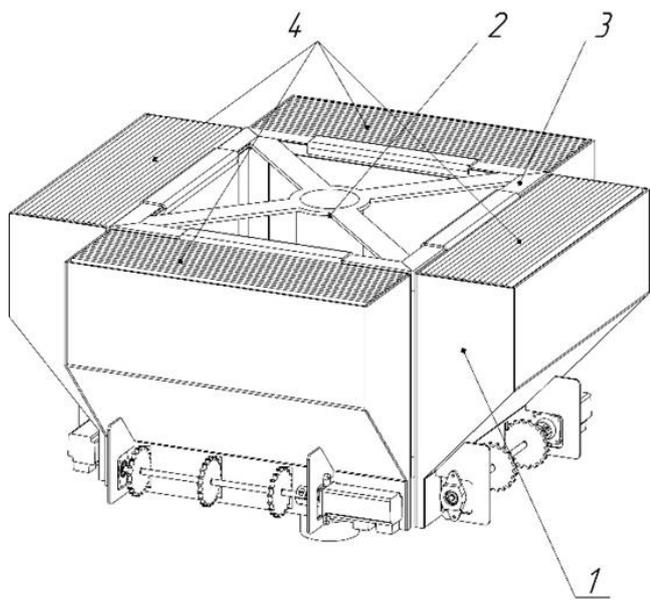
- автоматизация процесса армирования;
- обеспечение жёсткой связи между стенками;
- гибкость в выборе угла и плотности укладки арматуры.

Такое решение демонстрирует высокий уровень автоматизации и потенциал для применения в промышленном строительстве [4].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение автоматизированного стержневого армирования сдерживается:

- отсутствием нормативной базы для расчёта и контроля 3D-печатных армированных конструкций;
- недостаточной изученностью долговечности композитной арматуры в бетонной среде;
- высокой стоимостью первоначальной интеграции оборудования.

Однако эти вызовы являются временными. С развитием технологий машинного обучения и цифровых двойников появляется возможность оптимизации процессов армирования и прогнозирования поведения конструкций на всех этапах жизненного цикла [1].



1 – прутковый армировщик; 2 – экструдер; 3 – несущая рама; 4 – механизм подачи прутьев

Рисунок 3 – Прутковый армировщик для строительного 3D-принтера [4]

#### Заключение

Проведённый анализ показал, что армирование является ключевым фактором, определяющим прочность и долговечность 3D-печатных строительных конструкций. Среди существующих методов – внутреннее, внешнее и интегрированное армирование – особое внимание следует уделить технологиям, обеспечивающим высокую степень автоматизации и точность.

Стержневой армировщик строительного 3D-принтера представляет собой перспективное инженерное решение, позволяющее интегрировать армирование в аддитивный процесс, минимизируя ручной труд и повышая надёжность конструкций. Его внедрение способствует не только улучшению технико-экономических показателей строительства, но и трансформации отрасли в сторону цифровых технологий.

Дальнейшее развитие данной технологии требует:

- разработки новых нормативных стандартов для 3D-печатных армированных конструкций;
- исследования долговечности композитной арматуры в бетонной среде;
- подготовки квалифицированных специалистов и интеграции AI-алгоритмов в проектирование.

Таким образом, стержневое армирование является важным шагом на пути к устойчивому, эффективному и инновационному строительству будущего.

#### Список цитированных источников

1. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/360>.
2. Патент РФ № 2683447. Способ возведения монолитного здания, сооружения методом 3d-печати и устройство для его осуществления, E 04 C 5/07. Заявл. 05.12.2017, опубл. 28.03.2017.
3. Патент РФ № 2724163. Экструдер строительных смесей для 3D-принтера, В 29 С 64/209. Заявл. 28.08.2019, опубл. 22.06.2020.
4. Пат. 13479 U Респ. Беларусь : МПК (2017.01) В 29С 64/209 / Черкасов Н. Н., Нерода М. В.; дата публ.: 2024.05.20.
5. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 209–225. – DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.
6. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim [et al.] // *Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 1221–1232. – DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.

7. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49, Iss. 4. – P. 1213–1220. – DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Ma, G. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material – An emerging technique for construction / G. Ma, L. Wang, Y. Ju // *Science China Technological Sciences*. – 2018. – Vol. 61, Iss. 4. – P. 475–495. – DOI: 10.1007/s11431-016-9077-7.
9. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J. H. Lim, M. J. Tan // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.040.
10. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 37–49. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
11. Wolfs, R. J. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing / R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, T. A. M. Salet // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 106. – P. 03–116. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
12. Hambach, M. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste / M. Hambach, D. Volkmer // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
13. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
14. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
15. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry / Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 68. – P. 21–31. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
16. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities / Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rührer // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 72. – P. 347–366. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
17. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
18. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran [et al.] // *Materials Letters*. – 2015. – Vol. 139. – P. 165–168. – DOI: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
19. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / Tuan D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
20. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies / B. Khoshnevis // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, Iss. 1 – P. 5–19. – DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.

#### References

1. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/360>.
2. Patent RF № 2683447. Sposob vozvedeniya monolitnogo zdaniya, sooruzheniya metodom 3d-pechati i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya, E 04 S 5/07. Zayavl. 05.12.2017, opubl. 28.03.2017.
3. Patent RF № 2724163. Ekstruder stroitel'nyh smesey dlya 3D-принтера, V 29 S 64/209. Zayavl. 28.08.2019, opubl. 22.06.2020.
4. Pat. 13479 U Resp. Belarus' : MPK (2017.01) V 29S 64/209 / CHerkasov N. N., Neroda M. V.; data publ.: 2024.05.20.
5. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 209–225. – DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.

6. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim [et al.] // *Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 1221–1232. – DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
7. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49, Iss. 4. – P. 1213–1220. – DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Ma, G. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material – An emerging technique for construction / G. Ma, L. Wang, Y. Ju // *Science China Technological Sciences*. – 2018. – Vol. 61, Iss. 4. – P. 475–495. – DOI: 10.1007/s11431-016-9077-7.
9. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J. H. Lim, M. J. Tan // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.040.
10. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 37–49. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
11. Wolfs, R. J. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing / R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, T. A. M. Salet // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 106. – P. 103–116. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
12. Hambach, M. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste / M. Hambach, D. Volkmer // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
13. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
14. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
15. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry / Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 68. – P. 21–31. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
16. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities / Nathalie Labonnote, Anders Rønning, Bendik Manum, Petra Rüter // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 72. – P. 347–366. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
17. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
18. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran [et al.] // *Materials Letters*. – 2015. – Vol. 139. – P. 165–168. – DOI: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
19. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / Tuan D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
20. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies / B. Khoshnevis // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, Iss. 1 – P. 5–19. – DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.

*Материал поступил 21.05.2025, одобрен 14.07.2025, принят к публикации 25.07.2025*