

УДК 624.05

## ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**С.В. Сабаева**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Требования современного строительства - это прочный фундамент и перекрытия, низкая себестоимость. Эти условия обеспечивают новые технологии, которые постоянно совершенствуются, как, например, 3D-печать (аддитивные технологии). Уникальность этой технологии заключается в том, что можно значительно снизить производственные затраты. Еще одно преимущество - возможность облегчить строительство сложных архитектурных моделей, которые позволят решать более трудные архитектурные и дизайнерские решения. Использование 3D-печати обещает коммерческие выгоды, основанные на меньшем количестве необходимого персонала и снижении материальных затрат. Кроме достоинств и недостатков 3D-печати в статье описаны технологии и методы трёхмерной печати, материалы для аддитивных технологий, а также определены перспективы использования 3D-печати в строительстве. Выявлено, что несмотря на множество положительных качеств 3D-печати, внедрение этой технологии в России не достигло значительного уровня. Существующие технологии трёхмерной печати предъявляют жёсткие требования к свойствам используемого строительного материала, в связи с чем разработка составов строительных смесей для 3D-печати занимает особое место в развитии технологии аддитивного строительства. В настоящее время проблемой внедрения данной технологии является подбор составов смесей для 3D-принтеров с использованием местных вяжущих и подготовка кадров для работы по новой технологии.

**Ключевые слова:** 3D-принтер, 3D-печать, аддитивные технологии, бетон, экструзия, строительные смеси, контурное строительство, автоматизация строительства.

**Ссылка для цитирования:** Сабаева С.В. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 5(5). С. 39-44. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/5/39-44.pdf>

## APPLICATION OF 3D PRINTING IN CONSTRUCTION

**S.V. Sabaeva**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** The requirements of modern construction are a solid foundation and floors, low cost. These conditions provide new technologies that are constantly being improved, such as 3D printing (additive technologies). The uniqueness of this technology lies in the fact that it is possible to significantly reduce production costs. Another advantage is the ability to facilitate the construction of complex architectural models that will allow solving more difficult architectural and design decisions. The use of 3D printing promises commercial benefits based on fewer personnel required and lower material costs. In addition to the advantages and disadvantages of 3D printing, the article describes technologies and methods of three-dimensional printing, materials for additive technologies, and also identifies the prospects for using 3D printing in construction. It was revealed that despite the many positive qualities of 3D printing, the introduction of this technology in Russia has not reached a significant level. Existing 3D printing technologies impose stringent requirements on the properties of the building material used, and therefore the development of building mixtures for 3D printing takes a special place in the development of additive construction technology. Currently, the problem of introducing this technology is the selection of mixtures for 3D printers using local binders and training of personnel to work on the new technology.

**Keywords:** 3D printer, 3D printing, additive technologies, concrete, extrusion, building mixtures, contour construction, construction automation.

**For citation:** Sabaeva S.V. Application of 3D printing in construction // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2021. No. 5(5). Pp. 39-44. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/5/39-44.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

Еще несколько лет назад 3D-печать (аддитивное производство) использовалась в строительном секторе в основном для производства строительных элементов, таких как элементы внутренней отделки, мебель и т.д. Сейчас же 3D-печать находит все большее применение в строительном сегменте из-за растущего спроса на высокую производительность и быстроту создания сложных конструкций. В последние годы строительные компании только увеличивают количество проектов по 3D-печати, причем конструкций всё большего размера.

За последние несколько лет интерес исследователей и практиков к использованию 3D-печати для строительства зданий и сооружений возрос в геометрической прогрессии. Технология 3D-печати применяется сегодня в различных областях промышленности благодаря значительным преимуществам создания функциональных прототипов в разумные сроки, сборки с меньшими трудозатратами, небольшим количеством отходов, меньшим вмешательством человека и минимальными материальными затратами.

Технология 3D-печати уже не новая, поэтому с каждым годом появляется всё больше научных публикаций, связанных с этой темой.

Большая группа работ посвящена традиционным и инновационным материалам для строительной 3D-печати [1-5]. Громько П.А., Малаховс И., Беляева С.В. рассматривают геополимерный бетон [1]. Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. занимались вопросами подбора составов смесей, в которые входит доменный шлак [2]. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Сеницин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. описали проблемы и перспективы использования гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати [3]. В статье Коваленко Р.В. приводит обзор современных полимерных материалов и технологий 3D-печати [4]. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. описывают влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати [5].

Немаловажен вопрос эффективности применяемых материалов и самой технологии 3D-печати. В открытом доступе можно найти немало научных работ по данной тематике. Так, например, Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. дают технико-экономическую оценку эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве [6]. В данном случае в качестве критерия эффективности используется минимум затрат на 1 м<sup>2</sup> общей площади строящегося жилого объекта. При этом рассчитываются показатели прямых затрат и трудоемкость возведения здания. Затраты на использование геополимерной 3D-печати в строительстве рассматриваются в работе Погудина В.В. [7]. Автор проанализировал затраты и пришел к выводу, что 3D-печать геополимера на строительной площадке экономически более выгодна по сравнению с печатью на заводе. Шаторная А.М., Числова М.М., Дроздецкая М.А., Птухина И.С. исследуют эффективность технологии 3D-печати бетоном [8]. Авторы пришли к выводу, что 3D-принтеры позволяют экономить время, необходимое для строительства каркаса здания, что влияет на общую стоимость строительства.

## ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ 3D-ПЕЧАТИ

Выделяют несколько методов трёхмерной печати: контурное строительство, бетонная печать и D-образный процесс печати. Основной принцип всех методов заключается в создании любой сложной структуры путем добавления небольших слоев материала друг над другом. Процесс начинается с создания компьютерной 3D-модели, которая нарезается на несколько 2D-слоев, а затем постепенно печатается с назначенным материалом для получения прототипа.

**Контурное строительство** - аддитивная технология, в которой используется компьютерное управление для возведения несущих и ограждающих конструкций с ровной поверхностью. Важными преимуществами контурного строительства являются лучшее качество поверхности конструкции, более высокая скорость возведения и более широкий выбор применяемых материалов.

Важный элемент данного метода - использование двух ограничительных пластин для создания ровной поверхности объектов. Метод постепенного наращивания слоёв позволяет изготавливать различные формы поверхностей. Это метод, который сочетает в себе процесс экструзии для создания внешней поверхности и заливку для создания сердцевины. С помощью экструзии создаётся только оболочка каждого слоя объекта. После формирования замкнутой секции каждого слоя, пространство, заключенное между краями объекта можно заполнить другим материалом, например, бетоном [9].

**Бетонная печать** похожа на контурное строительство в экструзии цементного раствора в процессе наслоения. Данный процесс печати может выполняться без применения трудоемких опалубочных работ, он также имеет возможность включать функциональные пустоты в структуру [10]. Однако этот процесс

был разработан без шпателей, используемых в контурном строительстве, так что для достижения большего уровня 3D-свободы требуется меньшее разрешение осаждения. Это различие привело к большему контролю внутренней и внешней геометрии.

Для бетонной печати характерна ребристая отделка (рис.1). Если желаемая отделка должна быть гладкой, она требует либо затирки влажного материала в процессе строительства, либо последующего шлифования печатной отделки до гладкой поверхности. Все это должно быть выполнено вручную, потому что возможности автоматизации этого процесса пока нет [11].



Рис. 1. Бетонная печать [12]  
Fig. 1. Concrete printing

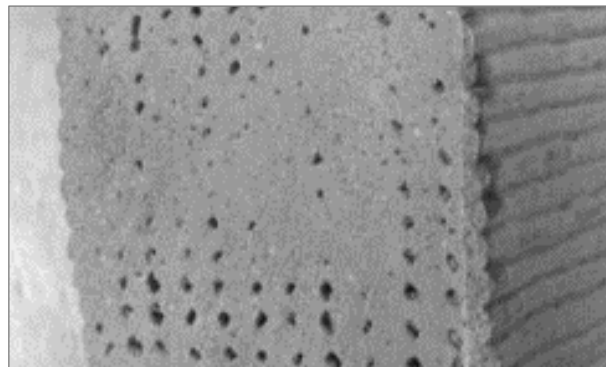


Рис. 2. Неудачный пример печати с пустотами [13]  
Fig. 2. Unsuccessful example of printing with voids

Между отдельными нитями цементной пасты могут образовываться пустоты, как показано на рис.2, ослабляя несущую способность. Связь между нитями, а также между слоями влияет на прочностные свойства бетонных компонентов. Низкая усадка имеет важное значение, поскольку компоненты свободной формы строятся без опалубки, что может ускорить испарение воды в бетоне и привести к растрескиванию [11].

**Д-образный процесс печати.** В 2010 году итальянский профессор Энрико Дини изобрел первый в мире цифровой принтер D-Shape (рис.3, рис.4), использующий в качестве материалов для печати мелкие заполнители и цементные материалы, который может печатать здания высотой до 4 м. В нижней части этого принтера есть сотни сопел, которые распыляют магнезиальный цемент. Песок распыляется на цемент. Слой цемента и песка объединяются, чтобы сделать песок похожим на камень. Когда деталь закончена, её выкапывают из рыхлого слоя порошка.



Рис. 3. Принтер D-Shape<sup>1</sup>  
Fig. 3. D-Shape Printer

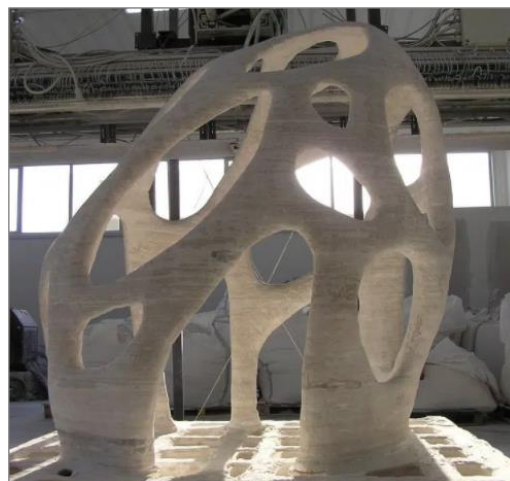


Рис. 4. Первая крупноформатная геометрически сложная скульптура, напечатанная на 3D-принтере D-Shape<sup>1</sup>  
Fig. 4. The first large-format geometrically complex sculpture printed on a D-Shape 3D printer

<sup>1</sup> One-to-one with Enrico Dini, the Italian who invented binder jetting for construction [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.3dprintingmedia.network/one-to-one-with-enrico-dini-the-italian-who-invented-binder-jetting-for-constructions> (дата обращения: 10.09.2021)

Создание такой формы имеет множество преимуществ перед традиционными процессами формирования (использование опалубки с бетоном), а также другими строительными процессами 3D-печати. Этот метод способен использовать любой песчаноподобный материал и производит мало отходов, так как оставшийся песок, который не прилипает к объекту, может быть повторно применён в другом месте. Используемые материалы - это все природные вещества, которые требуют очень небольшой обработки перед применением в процессе изготовления. В результате получается конечный продукт, очень похожий на натуральный камень [14].

#### МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Основным материалом для 3D-печати строительных конструкций являются мелкозернистые смеси (рис.5, рис.6), которые отличаются от традиционного бетона. Каждая компания разрабатывает свою рецептуру, которая соответствует устройству принтера и его сопла, а также специфике готовых изделий.

Самые важные параметры бетона для 3D-принтера - это прочность, скорость застывания и набора прочности, пластичность. Свойства бетона регулируются составом смеси, количеством цемента и качества заполнителей.



**Рис. 5.** Мелкозернистые смеси для 3D-печати<sup>2</sup>  
**Fig. 5.** Fine-grained mixes for 3D printing



**Рис. 6.** Мелкозернистая бетонная смесь. Печать на 3D-принтере<sup>2</sup>  
**Fig. 6.** Fine-grained concrete mix. 3D printing

В качестве материала для строительных 3D-принтеров используются следующие материалы: цемент (портландцемент), песок (диоксид кремния, хромит, циркон, кварцевое стекло), гипс, пластификаторы, анти-замораживающие добавки, волокна, ускорители (замедлители) схватывания.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Не стоит пока ждать напечатанных на 3D-принтере высотных зданий. Основные трудности возникают из-за того, что процесс 3D-печати зданий сегодня не признается в качестве метода строительства многими органами регулирования по нормативам и стандартам. Поскольку печатные конструкции не являются традиционными, рассчитать многие технические характеристики пока трудно, поэтому жилые конструкции придется проверять в каждом конкретном случае отдельно.

В ближайшие годы строительные аддитивные технологии будут использоваться в основном для изготовления декоративных элементов и относительно небольших дизайнерских объектов. Масштаб применения будет напрямую зависеть от стоимости материалов, рабочей силы и даже географического расположения.

Российский рынок строительной 3D-печати продолжает развиваться. Наиболее известные компании в этой сфере - Спецавиа, Бетонатор, RENCA, 3DefnHand. Отдельно стоит отметить наличие ряда сильных региональных научных и образовательных центров, ориентированных на 3D-печать, которые активно взаимодействуют с местным бизнесом.

Основной проблемой в процессах выполнения строительных работ является их тесная связь с большим количеством ручного труда, что не только замедляет темпы проведения этих работ, но и влечет за собой дополнительные расходы. Применение 3D-принтеров в данной отрасли поможет решить

<sup>2</sup> 3D-печать в строительстве: как это работает, технологии и 3D-принтеры [Электронный ресурс]. - URL: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printing-of-buildings-technologies-and-3d-printers.html> (дата обращения: 12.09.2021)



существующие проблемы, а также позволит вывести сферу строительства зданий и сооружений на новый уровень [15].

В строительной отрасли наблюдается растущая нехватка квалифицированных кадров, которая в будущем будет еще больше усугубляться. Строительная отрасль является одной из самых опасных сред, с которыми приходится сталкиваться. 3D-печать способна сократить количество персонала, необходимого на объекте. Это связано с тем, что строительные работы могут быть полностью автоматизированы и потребуются только минимальный надзор.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D-печать позволяет на сегодняшний день создавать уникальные строительные конструкции. С такими факторами, как необходимость сокращения производственных затрат и времени постройки, дополнительные проблемы безопасности, стремление к увеличению архитектурной свободы, повышение стандартов качества и желание упростить работу, строительная отрасль постепенно приближается к автоматизации. Возможность перейти непосредственно от компьютерной программы к изготовлению конструкции сокращает время выполнения заказа благодаря чему достигается значительная экономия затрат.

С другой стороны, технология имеет некоторые серьезные ограничения для использования в строительных работах. Нынешняя непригодность автоматизированных процессов для действительно крупномасштабного производства, сильно ограниченный объем материалов, высокая цена на обучение сотрудников, организацию и управление, вместе с ценой самого оборудования, является слишком высокой.

Есть надежда, что в ближайшем будущем 3D-печать сможет полностью конкурировать с более традиционными способами строительства. Для этого необходимо преодолеть различные препятствия, связанные со стоимостью оборудования, техническими ограничениями, специальными навыками, правилами и скептицизмом клиентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громыко П.А., Малаховс И., Беляева С.В. Геополимерный бетон - инновационный экологичный материал для строительства и 3D-печати // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт. В 3 ч.. отв. ред. Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. 2019. С. 214-217.
2. Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. Подбор составов смесей для 3D печати // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3.
3. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 39-44.
4. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 263-266.
5. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 122-134.
6. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Технико-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // Жилищное строительство. 2019. № 12. С. 52-56.
7. Погудин В.В. Затраты на использование геополимерной 3D-печати в строительстве // Молодой ученый. 2021. № 37 (379). С. 19-22.
8. Shatornaya A.M., Chislova M.M., Drozdetskaya M.A., Puhina I.S. Efficiency of 3D printing in Civil Engineering // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. № 9 (60). С. 22-30.
9. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies // Automation in Construction. Vol. 13, Issue 1. 2004. Pp. 5-19.
10. Lim S., Buswell R., Le T., Wackrow R., Austin S., Gibb A., Thorpe T. Development of a viable concrete printing process // Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011. Pp. 665 – 670.
11. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // Automation in Construction. 2012. Vol. 21. Issue 1. Pp. 262 – 268.
12. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures/Materiaux et Constructions. 2012. Vol. 45. Issue 8. Pp. 1221 – 1232.

13. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Issue 3. Pp. 558 – 566.

14. Tibaut A., Rebolj D., Nekrep Perc M. Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction // Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 27. Issue 1. Pp. 251 – 262.

15. Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12 (63). С. 71-96. DOI: 10.18720/CUBS.63.4

#### ОБ АВТОРАХ

**София Владимировна Сабеева** – студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: sabaeva.sv@edu.spbstu.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Sofia V. Sabaeva** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: sabaeva.sv@edu.spbstu.ru