

## К вопросу о возможностях и области рационального применения технологии 3D-печати строительных конструкций

*С.Г. Османов, М.А. Колотиенко*

*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация.** Представлены результаты анализа особенностей и опыта применения известных вариантов реализации технологии 3D-печати в строительном производстве. Уточнены преимущества, недостатки и, как следствие, область рационального применения таких вариантов при производстве работ подземного, надземного и отделочного циклов основного периода строительства зданий и спецсооружений.

**Ключевые слова:** строительное производство, 3D-печать, строительный 3D-принтер, бетонная смесь, экструзия бетонной смеси, 3D-напыление, трудозатраты, темпы строительства, бетонные работы, метод послойного экструдирования.

Потребность современной строительной отрасли в минимизации материально-технических, энергетических, трудовых, а в конечном итоге, и финансовых затрат, снижении травматизма и повышении качества готовой продукции путем механизации и автоматизации строительного производства, вызывает повышенный интерес к возможностям технологии 3D-печати конструкций зданий и специальных сооружений из монолитного бетона и железобетона. И постепенно это становится все более актуальным, ибо ежегодные общемировые объемы работ по возведению такого рода объектов растут весьма интенсивно [1, 2].

Увеличение спроса на данную технологию обусловлено прежде всего такими ее преимуществами как: высокие темпы и, соответственно, короткие сроки строительства; исключение необходимости использования съемной опалубки; минимизация риска возникновения проектных отклонений (благодаря высокоточному нанесению материала); широкий спектр возможных к реализации архитектурных форм, что соответствует не только высокому уровню стилистических качеств возводимого объекта, но и низкой концентрации напряжений в его конструкциях, обеспечиваемой за счет активного использования криволинейных структур [3, 4].

На данный момент рынок 3D-печати в строительстве представлен несколькими десятками компаний, продвигающими разного рода модификации трех основных вариантов рассматриваемой технологии, результаты анализа, обобщения и систематизации имеющейся разрозненной информации о которых представлены в табл. 1.

В средствах массовой информации довольно часто можно встретить утверждения, как, например, такие, что возведенный с использованием 3D-принтера объект можно ввести в эксплуатацию уже по прошествии 24 часов с момента начала строительных работ, полностью при этом исключив из них ручные операции. Однако следует иметь в виду, что это совершенно не так, ведь при создании и тиражировании подобных мифов абсолютно не учитывается время выполнения не только подготовительных процессов, таких как доставка на стройплощадку и размещение на ней необходимых материалов, полуфабрикатов и изделий (равно как впрочем и доставка, монтаж и пусконаладка самого оборудования для 3D-печати), но и процессов, связанных с отверждением уложенной в конструкции бетонной смеси, а также последующим монтажом коммуникаций, технологического оборудования, наружной и внутренней отделкой возводимого объекта, немислимыми в настоящее время без значительного объема ручного труда. В развитие этого авторы предприняли попытку разобраться, а насколько вообще эффективно процесс 3D-печати конструкций зданий и прочих сооружений может быть использован при производстве работ всех трех циклов их основного периода строительства.

Но, как оказалось, сложности возникают уже на стадии проектирования из-за отсутствия его нормативной базы, в т.ч. по части правил производства соответствующих работ и контроля их качества [5]. И на сегодняшний день известно лишь несколько таких "напечатанных" объектов, строительство которых было оформлено в соответствии с действующим законодательством.

---

Таблица 1

Особенности известных вариантов технологии 3D-печати строительных конструкций

Варианты Особенности		1. Контурная печать	2. Объемная печать	3. 3D-напыление
География реализующих компаний		CC-Corp, ApisCor (США); WinSun (КНР); АМТ-СПЕЦАВИА (РФ); BetAbram (Словения); Machines-3D (Франция)		Monolite (Великобритания), D-Shape (Франция)
Принцип печати		экструзия бетонной смеси по контуру возводимой конструкции с последующим заполнением межконтурного пространства конструкционно-теплоизоляционными материалами	экструзия бетонной смеси по конечному объему возводимой конструкции	осаждение неорганической связывающей жидкости на цементно-песчаный порошок
Основной материал конструкций		быстротвердеющий реакционно-порошковый бетон на основе портландцемента	мелкозернистый бетон на основе портландцемента, геополимерный бетон	быстротвердеющий реакционно-порошковый бетон на магниальном вяжущем
Армирование конструкций		стальной либо полимерной микрофиброй, добавляемой в состав сухой смеси; продольными сетками, монтируемыми вручную; сплошным тканым объемно-сетчатым каркасом по технологии Branch		не предусмотрено
Организационно-технологическая схема печати		печать здания либо спецсооружения целиком в условиях строительной площадки в проектном положении		печать отдельных конструкций в условиях завода либо приобъектного полигона
Ширина (высота) слоя печати, мм		15–60 (10–15)	9–50 (6–25)	5–15 (4–6)
Темп печати, м <sup>3</sup> /ч		0,6–2,5	0,4–0,6	1,2–3,5
Ручной труд	потребность	средняя	низкая	высокая
	виды работ	пусконаладочные, заполнение межконтурного пространства	пусконаладочные	удаление излишек порошка с готовых конструкций, соединение их между собой при укрупнении и монтаже

В нашей стране к таковым можно отнести лишь одноэтажное жилое здание в г. Ярославль общей площадью  $298,5 \text{ м}^2$ , введенное в эксплуатацию в 2017 году. В качестве основного материала его конструкций использовался традиционный мелкозернистый бетон класса В22,5, смесь которого экструировалась принтером порталного типа (модели S-6044 производства ГК «АМТ-СПЕЦАВИА») слоями толщиной 10 и шириной 30–50 мм соответственно при темпах строительства, доходивших до  $15 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Представленные выше первый и второй варианты рассматриваемой технологии к тому же предполагают наличие в составе внутриплощадочных работ ряда довольно трудоемких специальных работ подготовительного характера, уже упоминавшихся ранее. Так, относящийся к ним монтаж строительного 3D-принтера осуществляется на предварительно подготовленной спецплощадке с помощью крана и включает установку направляющих и (или) постоянных опор, а также роботизированного манипулятора, после чего обычно выполняются калибровочные работы и подключение принтера к электросети либо аккумуляторному блоку. Однако как правило сотрудниками компании-поставщика монтируемого оборудования, привлекаемыми на условиях почасового найма, производится непрерывное техническое сопровождение выполняемых работ.

Анализ мирового опыта применения технологии 3D-печати в строительстве также показал, что при производстве работ подземного цикла ее, как правило, не используют, возводя здания на фундаментах, устраиваемых по традиционным технологиям, т.к. в противном случае могут быть необоснованно завышены требуемые значения характеристик 3D-принтера (особенности определяющих его рабочую зону), уровень организации строительных работ и, как следствие, их стоимость, о чем свидетельствуют некоторые известные данные [6] об отдельных успешных случаях создания ленточных фундаментов по принципу контурной печати.

---

Основное применение рассматриваемая технология находит пока что при производстве работ надземного цикла. Однако и в этом случае, несмотря на высокий уровень автоматизации и, соответственно, индустриальности такого строительного производства, в структуре соответствующих трудозатрат по-прежнему остается значимой доля ручного труда, связанного с монтажом элементов армирования и закладных деталей, уплотнением экструдируемой смеси, а также последующим уходом за бетоном в процессе набора им прочности.

В ходе исследования установлено, что наибольшую сложность представляет процесс 3D-печати элементов покрытий зданий и спецсооружений, успешнее всего осуществляемый по третьему (из представленных в табл. 1) варианту данной технологии, позволяющему в цеховых условиях с использованием специальных матриц создавать укрупненные монтажные блоки покрытий с высокой степенью вариативности архитектурных форм, монтируемые впоследствии традиционными методами.

При проектировании производства работ по возведению надземных конструкций с использованием строительных 3D-принтеров следует особое внимание уделять рациональному подбору значений показателей, характеризующих технологические свойства используемой бетонной смеси [7]. К их числу прежде всего относятся удобоукладываемость, расслаиваемость, липкость и сохраняемость свойств во времени. Все они должны быть такими, чтобы, с одной стороны, не происходило засорения сопел печатающей головки принтера, а с другой стороны, обеспечивалось надежное сцепление укладываемых слоев смеси [8, 9] и исключалось их проседание под действием собственного веса сверх значений соответствующих допусков по приемке законченных конструкций. Соблюдение последнего из указанных требований, как представляется, позволило бы также обеспечивать максимально возможные для рассматриваемой технологии высоту

---

возводимых на захватке конструкций и, соответственно, темпы строительства в связи с отсутствием при этом дополнительных технологических перерывов для подсушивания уложенного бетона.

Что же касается работ отделочного цикла, то они, как уже коротко анонсировалось ранее, пока что не могут быть эффективно механизированы на основе применения современных строительных 3D-принтеров и выполняются традиционным образом примерно в тех же объемах и трудоемкости, что и в случае предшествующего возведения несущих и ограждающих конструкций без привлечения данного оборудования.

В ходе анализа эффективности используемых в строительстве вариантов технологии 3D-печати были уточнены и обобщены (табл. 2) сведения об их основных преимуществах и недостатках по отношению друг к другу.

Таблица 2

Уточненные сведения о преимуществах и недостатках известных вариантов технологии 3D-печати строительных конструкций

Варианты	Преимущества	Недостатки
Контурная печать	большая рабочая зона; высокая вариативность схем армирования, а также комбинированного использования конструкционных и теплоизоляционных материалов вертикальных конструкций	минимальный уровень автоматизации работ, необходимость выполнения не менее 50 % их объема по традиционным технологиям, невысокие прочностные характеристики возводимых конструкций
	гладкая (благодаря шпателям, закрепленным на печатающей головке) поверхность конструкций, невысокие трудо- и материалоемкость работ	высокая вероятность гравитационного деформирования свежееотпечатанных конструкций, а также слабого сцепления их слоев; низкая эффективность при устройстве горизонтальных конструкций
Объемная печать	технологическая простота, минимальные финансовые затраты	сильно ограниченные рабочая зона и число возможных схем армирования
3D-напыление	высокие прочностные характеристики промежуточной продукции (монтажных блоков) и эффективность при устройстве горизонтальных конструкций, в т.ч. нестандартных форм	повышенная шероховатость поверхности возводимых конструкций; максимальные трудо-, материалоемкость работ, а также уровень финансовых затрат на их производство

Рассуждая же в общем о преимуществах рассматриваемой технологии, эффективность которой авторы видят при использовании прежде всего в условиях сжатого по срокам строительства малоэтажных и небольших по площади зданий [10], а также прочих сооружений малых криволинейных форм, следует отметить и возможность вполне успешной адаптации такого строительства к зимним условиям, столь характерным для большей части нашей страны, в связи с чем научная и инженерная проработка аспектов 3D-печати конструкций в инвентарных малогабаритных тепляках («Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера», ЦНИИОМТП Госстроя СССР 1982 г. С. 177–181.) представляется одним из перспективных направлений развития современного строительного производства.

Таким образом, результаты выполненного исследования позволяют произвести некоторую переоценку складывающихся подходов к вопросу о рациональной области применения технологии 3D-печати строительных конструкций в целом и ее разновидностей в частности и, как следствие, более обоснованно и взвешенно принимать соответствующие организационно-технологические решения на предпроектном этапе.

### Литература

1. Османов С.Г., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. Выбор вариантов механизации бетонных работ в монолитно-каркасном строительстве // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507/).
2. Rael R., Fratello V.S. Printing Architecture: Innovative Recipes for 3D Printing. New York: Princeton Architectural Press, 2017. 176 p.
3. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Данилейко И.Ю. Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры //





Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5513/.

4. Naboni R., Paoletti I. Advanced Customization in Architectural Design and Construction. Berlin: Springer Verlag, 2015. 170 p.

5. Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3D printing in the construction industry // Automation in Construction. 2016. № 68. pp. 21–31.

6. Teymouri A. Potentialities and Restrictions of Construction 3D printing // Ammattikorkeakoulujen opinnäytetyöt ja julkaisut Theseus, 2017, № 21. URL: theseus.fi/bitstream/handle/10024/138400/Teymouri\_Amirahmad\_2017\_12\_12.pdf

7. Sanjayan G.J., Nazari A., Nematollahi B. 3D Concrete Printing Technology: Construction Applications. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 184 p.

8. Bos F.P., Wolfs R.J., Ahmed Z.Y., Salet T.A. Additive manufacturing of concrete in construction // Virtual and Physical Prototyping, 2016. № 11. URL: pure.tue.nl/ws/files/32795043/bosaddi2016.pdf.

9. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // Construction and Building Materials. 2017. № 145. pp. 639–647.

10. Sacks R., Eastman C., Lee C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018. pp. 305–317.

### References

1. Osmanov S.G., Manoylenko A.Yu., Litovka V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507/.

2. Rael R., Fratello V.S. Printing Architecture: Innovative Recipes for 3D Printing. New York: Princeton Architectural Press, 2017. 176 p.

3. Kravchenko G.M., Trufanova Ye.V., Danileyko I.YU. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1 URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5513/.





4. Naboni R., Paoletti I. Advanced Customization in Architectural Design and Construction. Berlin: Springer Verlag, 2015. 170 p.
5. Wu P., Wang J., Wang X. Automation in Construction. 2016. № 68. pp. 21–31.
6. Teymouri A. Ammattikorkeakoulujen opinnäytetyöt ja julkaisut Theseus, 2017, № 21. URL: [theseus.fi/bitstream/handle/10024/138400/Teymouri\\_Amirahmad\\_2017\\_12\\_12.pdf](https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/138400/Teymouri_Amirahmad_2017_12_12.pdf)
7. Sanjayan G.J., Nazari A., Nematollahi B. 3D Concrete Printing Technology: Construction Applications. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 184 p.
8. Bos F.P., Wolfs R.J., Ahmed Z.Y., Salet T.A. Virtual and Physical Prototyping, 2016, № 11. URL: [pure.tue.nl/ws/files/32795043/bosaddi2016.pdf](https://pure.tue.nl/ws/files/32795043/bosaddi2016.pdf).
9. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Construction and Building Materials, 2017. № 145. pp. 639–647.
10. Sacks R., Eastman C., Lee C. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018. pp. 305–317.