УДК 69.002.5

© Е. И. Рыбнов, к.т.н., д-р экон. наук, профессор

© А. Н. Егоров, к.т.н., д-р экон. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: anrie2000@mail.ru

© Н. С. Горовая, инженер-конструктор

(ООО «ПК»)

E-mail: natalia.abrmv@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-135-140

© E. I. Rybnov, PhD in Sci. Tech., Dr. Sci. Ec., Professor

© A. N. Egorov, PhD in Sci. Tech., Dr. Sci. Ec., Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: anrie2000@mail.ru

© N. S. Gorovaya, engineer-constructor

(«ПК» LLC)

E-mail: natalia.abrmv@gmail.com

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТУРНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

DEVELOPMENT OF CONTOUR CRAFTING TECHNOLOGY

Рассмотрена технология контурного строительства с использованием 3D-печати, исследованы возможности применения строительных принтеров. 3D-печать по сравнению с традиционными методами строительства следует рассматривать как экологически чистое производство, которое дает почти неограниченные возможности для реализации сложных архитектурно-планировочных решений зданий. Проанализированы зарубежные и отечественные разработки различных методов печати, показаны их достоинства и недостатки. Разработаны и систематизированы показатели, характеризующие технологии контурного строительства с применением 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, 3D-принтер, контурное строительство, методы, технологии, систематизация.

The article considers the technology of contour crafting using 3D-printing. The possibilities of using building printers are investigated. 3D-printing, as compared to traditional methods of construction, should be considered as environmentally friendly production. Using 3D-printing offers numerous possibilities for realization of different geometry building designs. Foreign and domestic developments of various printing methods have been analyzed considering their advantages and disadvantages. Indicators characterizing the technology of contour crafting with the use of 3D-printing have been worked out and systematized.

Keywords: 3D-printing, 3D-printer, contour crafting, methods, technologies, systematization.

Современные достижения научно-технического развития, такие как 3D-принтеры, наноматериалы, «зеленые» технологии и др., находят широкое применение в строительстве. Строительный комплекс стоит на пороге технологической революции в методах и технологиях возведения зданий, которые безусловно требуют концептуального осмысления на основе системного, комплексного анализа. Рассмотрим технологию контурного строительства с применением 3D-печати.

За последние десятилетия 3D-печать стала одной из самых быстро развивающихся технологий. Сегодня она широко используется во многих производственных процессах. Обладая рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами строительства,

3D-печать открывает широкий спектр возможностей для ее применения при возведении зданий и сооружений.

3D-печать относится к *аддитивному производству* — представляет собой процесс соединения материала для изготовления изделий по электронной геометрической модели, обычно путем его послойного нанесения (в отличие от *вычитающего, субтрактивного производства* с использованием механической обработки и традиционного — *формообразующего производства* с применением литья или штамповки)¹. В настоящее время в строительстве находят применение большеразмерные принтеры, которые могут производить как отдельные конструкции, так

¹ ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы — часть 1. Термины и определения.

и целые дома. В качестве материала используют бетонные смеси с различными добавками.

Последние десять лет компании и научные институты во всем мире активно ведут разработку методов и технологий 3D-печати. Рассмотрим их основные варианты.

«Контур крафтинг» — это развивающаяся технология, которая использует робототехнику для создания конструкций различных форм путем послойной укладки материала, при этом в строительстве в качестве материала применяются бетонные смеси [1]. Разработка данного метода принадлежит американскому профессору Университета Южной Калифорнии Бероку Хошневису [2]. Созданный 3D-принтер порталной конструкции устанавливается на строительной площадке после окончания работ по устройству фундаментов. Принтер располагается на рельсах, расположенных вдоль здания, максимальная высота принтера достигает 6 м. Бетон укладывается тонкими слоями посредством перемещающейся печатающей головки, формируя пустотелые стены с решеткой в виде фермы внутри, которая обеспечивает необходимую жесткость [3–5]. Печатающая головка может быть заменена на насадку в виде механической руки, которая может устанавливать элементы жесткости, а также перемычки, балки перекрытия, арматуру, трубы коммуникаций и др.

Метод строительства на основе применения 3D-принтера компании HuaShang. Еще один вариант 3D-принтера в виде порталной конструкции представлен китайской компанией Beijing HuaShang Tengda Industry and Trade. Технология печати значительно отличается от метода «Контур крафтинг». В начале строительная бригада устанавливает на площадке арматурный каркас будущего здания, а также трубы коммуникаций. Затем принтер, экструдер которого представляет собой раздвоенную насадку, укладывает бетонную смесь, образуя полнотелую бетонную стену.

Данная технология была реализована на примере печати двухэтажной виллы площадью 400 м², построенной за 45 дней. В качестве печатного материала был использован бетон C30 в количестве 20 т [6].

Достоинства данного метода:

- возможность печати зданий любой формы;

- повышенная сейсмостойкость, при этом возведенное здание выдерживает землетрясение силой 8 баллов по шкале Рихтера;

- возможность использования стандартных бетонных смесей.

Печать отдельных конструкций по методу компании WinSun. В отличие от вышеперассмотренных методов, китайская компания WinSun Decoration Design Engineering Co. специализируется на печати отдельных конструкций здания в заводских условиях, которые затем собираются на строительной площадке. При этом применяется самый большой в мире принтер с размерами 150 м в длину, 10 м в ширину и 6,6 м в высоту [7]. Компания WinSun успешно реализовала несколько проектов [7, 8], такие как:

- десять одноэтажных домов площадью 200 м² каждый — при этом дома были построены за 24 ч;
- двухэтажная вилла площадью 1100 м²;
- шестиэтажный многоквартирный дом, который является самым высоким в мире зданием, напечатанным на 3D-принтере.

Технологию, разработанную компанией, следует отнести к так называемым «зеленым» технологиям, так как в качестве печатающего материала может применяться смесь из строительных отходов, стекловолокна, цемента и специальных добавок [8, 9].

3D-печать с применением мобильного принтера компании ApisCor. Российская компания ApisCor разработала уникальный мобильный 3D-принтер для печати домов на строительной площадке². Основным его преимуществом является компактность и небольшой вес, что позволяет доставлять его на место строительства при помощи стандартной транспортной техники. Конструкция представляет собой вращающуюся вокруг своей оси механическую руку с печатающей головкой, при этом максимальный радиус печати — 8,5 м. Принтер устанавливается по центру площадки и после калибровки готов к применению. Он может быть использован и для проведения работ нулевого цикла. Принтер печатает опалубку для фундамента, в которую затем устанавливают арматуру и заливают раствор тяжелого бетона. Надземную часть здания принтер возводит в направлении от внутренних стен к наружным. Если предусмотрено многоэтажное

² Официальный сайт проекта ApisCor. URL: <http://apis-cor.com>

здание, то принтер переставляется на последующие этажи.

Кроме того, компания ApisCor предусмотрела автоматизированную систему смешивания и подачи бетонной смеси.

Описанные выше методы 3D-печати в строительстве не являются единственными [10–13], в то же время они характеризуют основные направления развития данной технологии. Преимущества и недостатки вышеизложенных методов представлены в табл. 1.

Выполненный анализ также позволил сформулировать следующие общие преимущества 3D-технологии:

1) сокращение времени возведения здания за счет более высокого уровня автоматизации строительных работ;

2) разнообразие архитектурно-планировочных решений и геометрических форм печатаемых конструкций;

3) уменьшение трудоемкости возведения здания и, как следствие, сокращение трудовых ресурсов, необходимых для строительства зданий с применением технологий 3D-печати;

4) высокий уровень экологичности строительного процесса, значительное сокращение строительного мусора и отходов.

В процессе проведения исследований определены и систематизированы основные показатели, характеризующие технологии контурного строительства (в табл. 2).

В настоящее время технология 3D-печати пока еще находится на стадии развития. Однако с уверенностью можно констатировать, что наряду с другими инновационными технологиями [14] для нее есть будущее при использовании в процессе возведения зданий. Неоспоримым достоинством является уменьшение времени и стоимости возведения объекта, что позволит применять ее в экстренном строительстве при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций [15]. Преимуществом данной технологии является также и то, что она позволяет реализовывать сложные архитектурно-планировочные решения. Однако одним из важнейших плюсов является возможность в процессе развития данной технологии существенного снижения стоимости строительства, что приведет к повы-

Таблица 1

Анализ методов 3D-печати в строительстве

Метод	Реализация проекта	Преимущества	Недостатки
«Контур крафтинг» (США)	Теоретические проработки	<ul style="list-style-type: none"> Многофункциональность принтера — печатающая головка может быть заменена на краноподобную руку, выполняющую различные монтажные процессы Высокая степень автоматизации 	<ul style="list-style-type: none"> Ограниченная высота печатаемых конструкций Тяжелая конструкция принтера
Принтер в виде портала компании HuaShang (Китай)	Напечатан двухэтажный особняк	<ul style="list-style-type: none"> Возможность использования стандартных бетонных смесей без добавок Сейсмоустойчивость напечатанных зданий 	<ul style="list-style-type: none"> Ограниченная высота печатаемых конструкций Тяжелая конструкция принтера
Печать отдельных конструкций компанией WinSun (Китай)	Возведены: 10 одноэтажных домов, 1 десятиэтажный дом, 1 особняк	<ul style="list-style-type: none"> Высокая скорость возведения благодаря унификации конструкций Печать элементов декора для фасада здания 	<ul style="list-style-type: none"> Дополнительные затраты на перевозку и монтаж напечатанных конструкций
Мобильный принтер ApisCor (Россия)	Реализована конструкция принтера	<ul style="list-style-type: none"> Легкость конструкции, простота установки Нет необходимости предварительного выравнивания площадки Высокая степень автоматизации 	<ul style="list-style-type: none"> Ограниченный радиус действия

шению доступности жилья и положительному социально-экономическому эффекту [16–18].

Вместе с тем существуют ограничения, затрудняющие широкое использование строительных технологий 3D-печати в ближайшее время. Главная сложность — разработка и утверждение свода правил, по которым будут печататься

конструкции. Также необходима дальнейшая значительная работа по подбору оптимальных составов смесей для строительных принтеров, повышению уровней их мобильности, техники безопасности применения и др.

Тем не менее, технология 3D-печати имеет значительный потенциал развития, реализация

Таблица 2

Основные показатели, характеризующие контурное строительство

Код	Показатели
1	➤ Уровень технологичности:
1.1	уровень автоматизации
1.2	отсутствие необходимости в специальной подготовке площадки перед установкой принтера и т. д.
1.3	размер зоны установки принтера
1.4	пространство рабочей зоны печати принтера
1.5	возможность осуществления работ в стесненных условиях
1.6	возможность выполнения работ нулевого цикла
1.7	необходимость монтажа дополнительного каркаса здания, усиливающего и/или формирующего конструкцию здания (стен, перекрытий и др.)
1.8	возможность использования различных строительных смесей
1.9	другие критерии технологичности (в зависимости от конкретного строительного проекта)
2	➤ Уровень ресурсосбережения:
2.1	• при проектировании и производстве оборудования 3D-принтера:
2.1.1	стоимость проектирования и выпуска оборудования 3D-принтера
2.1.2	материалоемкость оборудования
2.1.3	энергоёмкость выпуска оборудования
2.1.4	трудоемкость выпуска оборудования
2.2	• при эксплуатации оборудования 3D-принтера:
2.3	себестоимость строительства здания
2.4	стоимость эксплуатации 3D-принтера
2.5	материалоемкость конструкций
2.6	энергоёмкость производства
2.7	трудоемкость возведения здания
3	➤ Уровень мобильности:
3.1	способность к транспортировке
3.2	быстрота развертывания, монтажа и подготовки оборудования к работе
3.3	возможность быстрой горизонтальной перестановки оборудования на стройплощадке
3.4	возможность вертикальной перестановки оборудования при возведении многоэтажных зданий
4	➤ Уровень экологичности:
4.1	• уровень отсутствия отрицательного воздействия на окружающую среду:
4.1.1	отсутствие строительного мусора на стройплощадке
4.1.2	низкий уровень вредных выхлопов в атмосферу
4.1.3	использование отходов промышленных производств в бетонных смесях для 3D-принтеров
4.1.4	низкий уровень шума при производстве строительных работ
4.2	• другие экологические требования.
5	➤ Уровень безопасности производства:
5.1	безопасность эксплуатации оборудования для рабочих и ИТР, находящихся на объекте
5.2	безопасность для людей, не занятых в строительстве, но находящихся вблизи производств

которого неизбежно приведет к технологической революции в области автоматизации строительных процессов. В этой связи крайне важно проблемно-ориентированное развитие университетской науки: архитектурно-планировочные решения, разработка оптимальных составов смесей для 3D-принтеров, в том числе с использованием отходов промышленности, совершенствование технологического оборудования существующих принтеров, разработка методик расчета конструкций, возводимых с применением 3D-печати, создание методов для применения технологии как в заводских условиях, так и в условиях строительной площадки, — все должно быть направлено на системное, комплексное развитие научного обеспечения строительства с использованием 3D-принтеров.

Выполненная в процессе исследования и изложенная в данной статье систематизация основных показателей технологии контурного строительства позволит ученым, инженерам, специалистам определять уровень существующих и создаваемых методов и технологий возведения зданий с применением 3D-печати.

Библиографический список

1. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting // *Journal of Automation in Construction*. 2013. № 29. Pp. 50–67.
2. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting — related robotics and information technologies // *Journal of Automation in Construction — Special Issue: The best of ISARC 2002*, vol. 13, Issue 1. January 2004. Pp. 5–19.
3. Zhang J., Khoshnevis B. Contour Crafting process plan optimization part I: single-nozzle case // *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2010. Vol. 4, № 1. Pp. 33–46.
4. Zhang J., Khoshnevis B. Contour Crafting process plan optimization part II: multi-machine cases // *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2010. Vol. 4, № 2. Pp. 77–94.
5. Khoshnevis B., Hwang D., Yao K., Yeh Z. Mega-scale fabrication by Contour Crafting // *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. Vol. 1, № 3. Pp. 301–320.
6. Scott C. Chinese Construction Company 3D-prints an entire two-story house on-site in 45 days // 2016, 16th June. URL: <http://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>
7. Severson B. Shanghai-based WinSun 3D-prints 6-story apartment building and an incredible home // 2015, 18th Jan. URL: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>
8. Luimstra J. WinSun uses waste to 3D-print houses for only 4800 dollars // 2014, 19th April. URL: <http://3dprinting.com/news/winsun-uses-waste-3d-print-houses-4800-dollars/>
9. Luimstra J. WinSun 3D-Printed Giant Apartment Building and Villa // 2015, 20th Jan. URL: <https://3dprinting.com/news/winsun-3d-printed-giant-apartment-building-villa/> (дата обращения: 28.01.2018).
10. Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., Violante M. G. 3D-printing technique applied to rapid casting // *Rapid Prototyping Journal*. 2007. Vol. 13. Issue 3. Pp. 148–155. URL: <https://doi.org/10.1108/13552540710750898> (дата обращения: 31.03.2018).
11. Vaezi M., Seitz H., Yang S. A review on 3D-micro-additive manufacturing technologies // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67, № 5. Pp. 1721–1754.
12. Tay Y. W. et al. Processing and properties of construction materials for 3D-printing // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 861. Pp. 177–181.
13. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: a review // *International Journal of Construction Management*. 2015. Vol. 15, № 1. Pp. 1–9.
14. Егоров А. Н., Шприц М. Л., Гдимиян Н. Г. Инновационные технологии в строительстве // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 3 (59). С. 130–137.
15. Егоров А. Н. Организация и управление экстренным строительством: учеб. пособие. СПб.: СПбГАСУ, 2017. 101 с.
16. Huang S. H. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67, № 5–8. Pp. 1191–1203.
17. Weinstein D., Nawara P. Determining the applicability of 3D-concrete construction (contour crafting) of low income houses in select countries // *Cornell Real Estate Review*. 2015. Vol. 13, № 1. Pp. 94–111. URL: <http://scholarship.sha.cornell.edu/crer/vol13/iss1/11> (дата обращения: 03.02.2018).
18. Zavadskas E. K. Automation and robotics in construction: international research and achievements // *Automation in construction*. Vol. 19. 2010. Pp. 286–290.

References

1. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Journal of Automation in Construction*, 2013, no. 29, pp. 50–67.

2. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting — related robotics and information technologies. *Journal of Automation in Construction*. Special Issue. The best of ISARC. 2002, vol. 13, issue 1, January 2004, pp. 5–19.
3. Zhang J., Khoshnevis B. Contour Crafting process plan optimization part I: single-nozzle case. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 33–46.
4. Zhang J., Khoshnevis B. Contour Crafting process plan optimization part II: multi-machine cases. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 77–94.
5. Khoshnevis B., Hwang D., Yao K., Yeh Z. Mega-scale fabrication by Contour Crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 301–320.
6. Scott C. Chinese Construction Company 3D-prints an entire two-story house on-site in 45 days. 2016, 16th June. Available at: <http://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house>
7. Severson B. Shanghai-based WinSun3D-prints 6-story apartment building and an incredible home. 2015, 18th Jan. Available at: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building>
8. Luimstra J. WinSun uses waste to 3D-print houses for only 4800 dollars. 2014, 19th April. Available at: <http://3dprinting.com/news/winsun-uses-waste-3d-print-houses-4800-dollars/>
9. Luimstra J. WinSun3D-Printed Giant Apartment Building and Villa. 2015, 20th Jan. Available at: <https://3dprinting.com/news/winsun-3d-printed-giant-apartment-building-villa/> (accessed: 28.01.2018).
10. Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., Violante M. G. 3D-printing technique applied to rapid casting. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, vol. 13, iss. 3, pp. 148–155. Available at: <https://doi.org/10.1108/13552540710750898> (accessed: 31.03.2018).
11. Vaezi M., Seitz H., Yang S. A review on 3D-micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, no. 5, pp. 1721–1754.
12. Tay Y. W. et al. Processing and properties of construction materials for 3D-printing. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 861, pp. 177–181.
13. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: a review. *International Journal of Construction Management*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 1–9.
14. Egorov A. N., Shprits M. L., Gdimiyani N. G. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve* [Innovative technologies in construction]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2015, no. 3 (59), pp. 130–137. (In Russian).
15. Egorov A. N. *Organizatsiya i upravlenie ehkstreennym stroitel'stvom: ucheb. posobie* [Organization and management of emergency construction. Teaching manual]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2017, 101 p. (In Russian).
16. Huang S. H. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, no. 5–8, pp. 1191–1203.
17. Weinstein D., Nawara P. Determining the applicability of 3D-concrete construction (contour crafting) of low income houses in select countries. *Cornell Real Estate Review*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 94–111. Available at: <http://scholarship.sha.cornell.edu/crer/vol13/iss1/11> (accessed: 03.02.2018).
18. Zavadskas E. K. Automation and robotics in construction: international research and achievements. *Automation in construction*, vol. 19, 2010, pp. 286–290.