

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 691.001

Л.В. ИЛЬИНА, Л.В. ЗАВАДСКАЯ

ОСОБЕННОСТИ И ЗАДАЧИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ

В строительной индустрии аддитивные 3D-технологии являются одним из перспективных направлений развития. Статья содержит обзор мирового опыта в области применения аддитивных технологий в строительстве. Использование 3D-технологий позволяет воплотить в жизнь архитектурные проекты любой сложности, сократить сроки, уменьшить количество производственных отходов, снизить себестоимость строительства, материальные, энергетические и трудовые затраты. Рассмотрены основные методы 3D-печати, используемые в строительстве, и раскрыты их отличительные особенности. Изучены материалы для изготовления строительной смеси и требования к составам мелкозернистого бетона для строительного 3D-принтера. Сформулированы критерии подбора составов бетонных смесей для применения в 3D-технологии. Проведен анализ существующих рецептов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, бетонные смеси, свойства смеси, строительные смеси.

DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-98-106

В настоящее время строительные технологии непрерывно развиваются. Преобразования направлены на сокращение сроков строительства, увеличение долговечности конструкций, экономию трудозатрат и снижение себестоимости. При этом большое внимание отводится обеспечению сохранности окружающей среды.

Прогресс в строительной сфере не стоит на месте, постоянно внедряются все более высокотехнологичные процессы, к числу которых можно отнести аддитивные технологии, т.е. создание пространственных объектов послойным добавлением материала [1]. За короткий промежуток времени данная технология заинтересовала большое количество крупных строительных предприятий. С ее помощью стало возможным создание не только различных архитектурных конструкций, но и возведение целых зданий и сооружений.

© Ильина Л.В., Завадская Л.В., 2018

С помощью 3D-технологии китайской компанией WinSun возведено за сутки 10 одноэтажных домов, каждый площадью 200 м². По самым смелым замыслам 3D-технологии можно будет использовать для строительства небольших коттеджей и возведения небоскребов.

Технология создания трехмерных объектов при помощи наращивания материала стала активно развиваться с 80-х гг. XX в. и на начальном этапе носила название «быстрое прототипирование» [2]. Родоначальником отрасли считается Чарльз Халл, основатель компании 3D Systems, который в 1986 г. собрал первый стереолитографический 3D-принтер. Это дало толчок развитию «аддитивного производства» – процесса создания объекта в трехмерном измерении на основе цифровой многомерной модели. Аддитивные технологии (AM – Additive Manufacturing) достаточно длительный период развивались медленно и настоящий прорыв отмечают с 2010 г. [3].

Использование аддитивных технологий имеет ряд достоинств:

- высокая скорость и точность строительства;
- простота эксплуатации 3D-принтеров;
- низкая себестоимость строительства;
- высокая архитектурная выразительность конструкций, понятие трудоемкости выполнения отдельных элементов становится неактуальным;
- объемная конструкция имеет повышенную монолитность за счет непрерывного нанесения слоя за слоем;
- минимизация использования ручного труда, повышение безопасности труда рабочих;
- минимальная численность обслуживающего персонала, как следствие, пониженная травмоопасность при строительстве;
- высокая экологичность строительства вследствие минимального количества отходов [1, 4–6].

Несмотря на то что технология 3D-печати является инновационной и перспективной, при этом возникает ряд нерешенных вопросов:

- ограничение 3D-технологий для массовой застройки вследствие отсутствия нормативной и законодательной базы для строительства зданий с помощью 3D-печати;
- высокая стоимость 3D-принтеров и необходимость специальной подготовки строительной площадки для укладки направляющих рельсов для 3D-принтеров и непрерывный контроль за соблюдением их параллельности для обеспечения высокой точности печати;
- ограничение габаритов строящегося здания размерами принтера;
- высокие требования к составу смеси, так как конструкция стены должна соответствовать условиям прочности и жесткости. Возникает противоречие: с одной стороны, для того чтобы не было закупорки печатающей головки, применяют пластификаторы, которые замедляют сроки твердения, с другой – необходимо обеспечить быстрое схватывание и твердение смеси для непрерывного нанесения последующих слоев;
- строительство с помощью данной технологии ограничивается теплым временем года, что затрудняет возведение зданий в северных областях.

Для строительства в зимний период сооружают отапливаемые временные шатры.

Кроме того, недостатками данного способа являются сложность, а в некоторых случаях и невозможность строительства зданий с открытой планировкой и сложных архитектурных форм из-за необходимости создания поддерживающих конструкций. Для решения этой проблемы исследователи из Института передовой архитектуры Каталонии (Испания) разработали группу из трех 3D-принтеров, которые благодаря своей мобильности способны печатать объекты неограниченного размера.

Для успешного применения АМ-технологии в строительстве необходимо использовать последние достижения в трех основных областях: информационные технологии (программное обеспечение процесса), машиностроение и автоматизация (конструкция, узлы и агрегаты 3D-принтера) и материаловедение (рецептура и свойства материала). В настоящий момент, учитывая почти тридцатилетнюю историю развития АМ-технологий, многие вопросы в первых двух областях уже решены благодаря тому, что они являются общими для всех 3D-принтеров, в какой бы области они не применялись [5].

Существуют три основных метода 3D-печати [7, 8] в строительстве:

- селективного спекания – расплавление кварцевого песка с помощью концентрированного лазера или солнечного луча;
- напыления (компонентной склейки, стереолитография), заключающегося в фотополимеризации композиции под воздействием лазерного луча;
- послойного экструдирования вязкой рабочей массы – выдавливание пластичной смеси через сопло 3D-принтера [7].

Первые два метода экологически безвредны, поскольку их реализация подразумевает использование солнечной энергии, а рабочей смесью является песок. Третий же метод – основной способ 3D-печати большинства строительных принтеров. При этом каждый последующий слой выдавливается 3D-принтером поверх предыдущего.

Наиболее передовой в сфере печати быстровозводимых зданий можно считать систему D-Shape. Она позволяет создавать полноразмерное здание из песка с использованием стереографического печатного процесса. Данный процесс трансформирует песок в минерал с микрокристаллическими характеристиками, работающий на сжатие и растяжение значительно лучше порландцемента, что исключает использование арматуры для усиления конструкций.

Большую роль в технологии строительной 3D-печати играет состав смеси. Вместе с тем в части рецептурного обеспечения аддитивной технологии в строительстве наблюдается серьезный пробел. При ближайшем рассмотрении вопрос создания мелкозернистых смесей, которые отвечали бы всем требованиям, оказывается не простым. Поэтому в рамках Международного союза лабораторий и экспертов в области испытаний строительных материалов, систем и конструкций RILEM функционировал отдельный технический комитет, объединяющий десятки специалистов из разных

стран мира, занимающийся вопросами разработки рецептуры и исследованиями свойств бетонов для 3D-технологий. Необходимость серьезных исследований в области материаловедения подтверждается мнением ряда авторов [4, 8].

В качестве формовочной смеси используются различные составы на основе цемента, шлакощелочного и гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, глинистый раствор, состоящий из глины, песка и натуральных волокон. Как правило, это быстротвердеющие составы, содержащие различные добавки для улучшения тех или иных характеристик несущих элементов конструкций (стен, перекрытий) [9]. В качестве армирующего компонента может применяться различная фибра или стальная арматура (как горизонтальная, так и вертикальная).

Китайская компания WinSun, которая первой напечатала серию настоящих домов, в начале 2014 г. использовала формовочную смесь, состоящую из строительного мусора, бетона и добавок.

Бетонная смесь, описанная в работе [6], имела минимальное водоцементное отношение и представляла собой высокопрочный бетон класса В50. В первые сутки конструкция на основе бетонной смеси обретает до 25 % проектной прочности, схватывание смеси происходит в течение 3–120 мин, при этом достаточно хорошо сохраняется форма, что необходимо для 3D-печати. Композит обладает малой усадкой (0,6 мм/м в возрасте 28 сут).

Быстротвердеющие составы на основе цемента предполагают:

- применение жесткой бетонной смеси с низкими значениями водоцементного отношения;
- использование добавок ускорителей твердения или глиноземистого цемента и др.;
- сухое или мокрое домальвание цемента с добавкой гипса (2–5 % от массы цемента) или с комплексными специальными добавками;
- активацию цементного раствора.

К основным требованиям данных составов относится малое время сохранения подвижности, позволяющее печатать элементы большой высоты без промежуточного твердения; быстрое нарастание прочности.

В качестве армирующего компонента может использоваться различная фибра или стальная арматура (горизонтальная и вертикальная). Фибра выполняет роль микроармирующего компонента, модифицирующего структуру строительных конгломератов на микроуровне, и позволяет обойтись без армирования стальной арматурой, так как в достаточной мере обеспечивает прочность и жесткость конструкции, вследствие чего уменьшается ее масса.

Вертикальная арматура устанавливается в технологические пустоты стен после печати с последующей заливкой пустот растворной смесью. Горизонтальное армирование производится между слоями конструкции в процессе печати с использованием стальных прутьев или плоских армокаркасов. Армирование стальной арматурой имеет существенные недостатки: применение ручного труда может вызвать неточности установки, а также требуется дополнительное время на армирование.

Существует два основных подхода приготовления мелкозернистой смеси для строительных 3D-принтеров:

- за пределами 3D-принтеров с перекачкой смеси в печатающую головку принтера;
- непосредственно в 3D-принтере.

При втором способе смешивание компонентов производится в печатающей головке. Смешивание и экструдирование происходят непрерывно с помощью вертикально расположенного шнекового смесителя. Преимуществами данного способа являются: отсутствие импульсов, возникающих при перекачивании готовой бетонной смеси к печатающей головке; возможность остановки процесса наложения смеси без возникновения отходов в виде уже приготовленной смеси и необходимости очистки транспортировочных шлангов; возможность быстрой корректировки свойств смеси путем оперативного изменения рецептурных параметров. Очевидно, что состав мелкозернистой бетонной смеси в этом случае должен быть представлен в виде сухой строительной смеси, требующей только добавления воды в необходимом количестве.

Разработка составов специальной строительной смеси для 3D-принтера требует определиться с требованиями к смеси, которые должны предъявляться как на стадии смеси, так и в затвердевшем состоянии. При этом можно условно выделить традиционные и обусловленные особенностями технологии требования (таблица) [5].

В части обеспечения традиционных требований следует применять известные методы и подходы в технологии бетонов и сухих строительных смесей, например, особые минеральные вяжущие (расширяющиеся [10, 11]) и отходы промышленности, в том числе стройиндустрии [12–14] и др. Для выполнения требований, обусловленных особенностями технологии, необходимо использовать комплекс добавок: для повышения пластичности – пластификаторы; для увеличения адгезии – ретиспергируемые полимерные

Общие требования к составам мелкозернистого бетона для строительного 3D-принтера

Состав бетона	Традиционные	Обусловленные особенностями технологии
Смесь, готовая к формованию	Связность (сплошность)	Формоустойчивость Пластичность Высокая водоудерживающая способность Способность полноценной гидратации в тонком слое Регулируемость сроков схватывания (жизнеспособность)
Затвердевший композит	Прочностные характеристики в проектном возрасте Деформационные характеристики (начальный модуль упругости, ползучесть) Морозостойкость	Регулируемость динамики набора прочности Обеспечение прочности сцепления между соседними слоями Ограничение усадочных деформаций

порошки; для обеспечения твердения при отрицательных температурах – противоморозные добавки; для повышения трещиностойкости, снижения усадки при твердении и улучшения прочностных характеристик – дисперсно-армирующие добавки (волокна), для уменьшения теплопроводности – легкие пористые заполнители; для повышения водоудерживающей способности – редиспергируемые полимерные порошки и метилцеллюлозу. Так называемое «окно печати», связанное со сроками схватывания смеси и характеризующее период, когда смесь отвечает требованиям сплошности и стабильности до момента затвердевания и затруднения подачи смеси, регулируется ускорителями твердения и должно составлять от 10 до 30 мин [15].

Заключение. Таким образом, проведенный анализ позволяет сформулировать некоторые общие выводы и требования, обеспечивающие внедрение 3D-печати в строительную практику.

В качестве расходного строительного материала («чернил») для 3D-печати следует использовать цементные системы с мелкозернистым заполнителем размером до 4 мм. Целесообразно применение минеральных добавок, микрофибры, противоусадочных химических добавок и т.п.

Перспективной задачей для 3D-печати является поиск комплексных технологических решений на всех этапах строительства, для чего необходима консолидация специалистов различного профиля.

Для выполнения специальных требований, обусловленных особенностями технологии, кроме традиционных подходов потребуются новые нестандартные рецептурно-технологические решения для материала, обладающего одновременно управляемой вязкостью и текучестью в процессе экструзии, а также заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Реализация последнего обуславливает организацию систематических исследований, обеспечивающих создание расходных строительных материалов с контролируемыми свойствами. Сложность таких исследований, в частности, связана с тем, что требует учета особенностей соответствующего технологического оборудования.

В настоящее время необходимо озаботиться подготовкой специалистов, способных внедрять и использовать на практике технологии строительства посредством 3D-печати.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулебякин А.А. Новые технологии. Развитие 3D-печати: перспективы и последствия // Молодеж. науч.-техн. вестн. 2015. № 3. С. 48.
2. Литовкин С.В., Петькова Ю.Р. Использование 3D-печати в машиностроении и строительстве // Актуальные проблемы современного машиностроения: Междунар. науч.-практ. конф. НИ ТПУ. Югра, 2015. С. 433–435.
3. Барковская Н.И. Вопросы стандартизации технологии 3D-печати // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 4. Минск: БНТУ, 2014. С. 403.
4. Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундам. исслед. 2014. № 11-12. С. 2673–2676.

5. У до до в С.А. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей // VI Международная научно-практическая конференция МЦНС «Наука и просвещение». Пенза, 2017. С. 58–61.
6. Лу не ва Д.А., Ко же в ни ко ва Е.О., Ка ло ши на С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 1. С. 90–101.
7. Ру дя к К.А., Че р ны ш е в Ю.О. Возведение зданий методом послойного экструдирования // Современные концепции развития науки: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Казань, 2016. С. 147–151.
8. Сте па но ва Е.Ю., Бар су ков Г.В., Сте па но в Ю.С. Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2016. № 8-2. С. 243–249.
9. 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. 2012. No. 8–45. P. 1221–1232.
10. Не све та ев Г.В., По та по ва Ю.И. Управление собственными деформациями цементного камня изменением состава и количества расширяющей добавки // Науч. обозрение. 2013. № 11. С. 46–49.
11. Не све та ев Г.В., У до до в С.А., Бы ч ко ва О.А. О влиянии состава модифицированного гипсоглиноземистого расширяющегося цемента на прочность и темп твердения // Науковедение. 2015. Т. 7, № 6. С. 122.
12. У до до в С.А., Че р ны х В.Ф. Особенности свойств сухих смесей с применением пористых заполнителей // Строит. материалы. 2006. № 3. С. 15–17.
13. Са й ду м о в М.С. Отсевы дробления бетонного лома и горных пород для получения бетонных композитов: Дис. ... канд. техн. наук / Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. Грозный, 2012.
14. П' і на L.V., Му к х і на I.N. Estimation of the applicability for the filler produced by recycling of concrete and reinforced concrete used in heavy concrete // Procedia Engineering 2. 2016. P. 1525–1530.
15. И но зем цев А.С., Ко ро лев Е.В. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13, вып. 7. С. 863–876.

Ильина Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Завадская Любовь Владимировна, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 18.09.18

Il'ina Liliya Vladimirovna, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Zavadskaya Lubov Vladimirovna, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FEATURES AND TASKS OF BUILDING MATERIAL SCIENCE ON THE DEVELOPMENT OF 3D-TECHNOLOGIES

In the construction industry additive 3D-technologies are one of the promising areas of development. The article contains a review of world experience in the application of

additive technologies in the construction industry. The use of 3D-technology allows to realize architectural projects of any complexity, reduce construction time, reduce the amount of industrial waste, reduce construction costs, reduce material, energy and labor costs for construction. The article describes the main methods of 3D printing used in construction and studied their distinctive features. The materials used for the manufacture of building mixtures have been studied. The requirements for the composition of fine-grained concrete for construction 3D-printer are studied. The criteria for the selection of concrete mixtures for use in 3D-technology are formulated. An analysis of existing formulations.

Key words: additive technologies, 3D printing, concrete mixes, mix properties, construction mixes.

REFERENCES

1. Kulebyakin A.A. *Novye tekhnologii. Razvitie 3D-pechati: perspektivy i posledstviya* [New technologies. The development of 3D printing: prospects and consequences]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnichestkiy vestnik* [Youth. scientific and technical herald]. 2015. No. 3. P. 48. (in Russian)
2. Litovkin S.V., Petkova Yu.R. *Ispol'zovanie 3D-pechati v mashinostroenii i stroitel'stve* [The use of 3D printing in mechanical engineering and construction]. *Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya: Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Actual problems of modern engineering: International scientific-practical conference]. Ugra, 2015. Pp. 433–435. (in Russian)
3. Barkovskaya N.I. *Voprosy standartizatsii tekhnologii 3D-pechati* [Questions of standardization of 3D printing technology]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: Materialy 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnichestkoy konferentsii* [Science – education, production, economics: materials of the 12th International Scientific and Technical Conference]. Vol. 4. Minsk: BNTU, 2014. P. 403. (in Russian)
4. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Borozdov O.V. *Vliyanie razvitiya 3D-tekhnologiy na ekonomiku stroitel'stva* [The influence of the development of 3D technologies on the construction economy]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2014. No. 11-12. Pp. 2673–2676. (in Russian)
5. Udodov S.A. *3D-pechat' v stroitel'stve: novoe napravlenie v tekhnologii betona i sukhikh stroitel'nykh smesey* [3D-printing in construction: a new direction in the technology of concrete and dry construction mixtures]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya MTsNS "Nauka i prosveshchenie"* [VI International Scientific and Practical Conference ICSC "Science and Education"]. Penza, 2017. Pp. 58–61. (in Russian)
6. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. *Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspektivy ee razvitiya* [The use of 3D printing in construction and the prospects for its development]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Construction and Architecture]. 2017. Vol. 8, No. 1. Pp. 90–101. (in Russian)
7. Rudyak K.A., Chernyshev Yu.O. *Vozvedenie zdaniy metodom posloynogo ekstrudirovaniya* [Construction of buildings by the method of layer extrusion]. *Sovremennye kontseptsii razvitiya nauki: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern concepts of the development of science: materials of the Intern. scientific-practical Conf.]. Kazan, 2016. Pp. 147–151. (in Russian)

8. Stepanova E.Yu., Barsukov G.V., Stepanov Yu.S. Proryvnye tekhnologii novogo pokoleniya formoobrazovaniya prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostey naukoemkikh izdeliy [Breakthrough technologies of a new generation of shaping spatially complex surfaces of high-tech products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science]. 2016. No. 8-2. Pp. 243–249. (in Russian)
9. 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*. 2012. No. 8–45. Pp. 1221–1232.
10. Nesvetaev G.V., Potapova Yu.I. Upravlenie sobstvennymi deformatsiyami tsementnogo kamnya izmeneniem sostava i kolichestva rasshiryayushchey dobavki [Managing your own deformations of a cement stone by changing the composition and quantity of expanding additive]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review]. 2013, No. 11. Pp. 46–49. (in Russian)
11. Nesvetaev G.V., Udodov S.A., Bychkova O.A. O vliyaniy sostava modifitsirovannogo gipsoglinozemistogo rasshiryayushchegosya tsementa na prochnost' i temp tverdeniya [On the effect of the composition of the modified gypsum-alumina expanding cement on the strength and rate of hardening]. *Naukovedenie* [Science of science]. 2015. Vol. 7, No. 6. P. 122. (in Russian)
12. Udodov S.A., Chernykh V.F. Osobennosti svoystv sukhikh smesey s primeneniem poristykh zapolniteley [Features of the properties of dry mixes with the use of porous fillers]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. 2006. No. 3. Pp. 15–17. (in Russian)
13. Saydumov M.S. Otsevy drobleniya betonnoogo loma i gornykh porod dlya polucheniya betonnykh kompozitov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Elimination of crushing of concrete scrap and rocks to obtain concrete composites: Candidate thesis]. Grozny, 2012. (in Russian)
14. Il'ina L.V., Mukhina I.N. Estimation of the applicability for the filler produced by recycling of concrete and reinforced concrete used in heavy concrete. *Procedia Engineering* 2. 2016. Pp. 1525–1530.
15. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologicheskikh resheniy 3D-pechati v stroitel'stve [Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2018. T. 13. Vol. 7. Pp. 863–876. (in Russian)