

Технология 3D-печати в строительстве и архитектуре

В.О. Герасимова, Н.С. Любин, В.С. Петрова

Тульский государственный университет, Тула

Аннотация: В статье представлено исследование современных достижений в области 3D-печати зданий и строительных компонентов. Технологии 3D-печати, по сравнению с традиционными технологиями строительства зданий, можно рассматривать как экологически безопасную производную, дающую практически неограниченные возможности для реализации геометрически сложных проектов. В этой статье были описаны два подхода к использованию данной технологии. Представлено краткое описание нескольких примеров новаторского использования 3D-печати в строительной сфере.

Ключевые слова: архитектура, 3D-печать, принтер, стереолитография, автоматизация.

1. Введение

Первый 3D-принтер был изобретен в 1984 году, и за последние десятилетия 3D-печать стала одной из самых быстроразвивающихся технологий. В начале это была очень сложная и, более того, дорогая технология. С годами 3D-печать заняла свое место в повседневной жизни людей, а принтеры стали широко использоваться во всех областях промышленности [1]. Много достижений было сделано в медицине, автомобильной и аэрокосмической промышленности. Благодаря системам с открытым исходным кодом, прототипирование нового продукта и использование приложений 3D-печати в различных областях доступны для всех.

Совершенствование печатного материала и 3D-технологий стало целью многих компаний во всем мире во всех отраслях промышленности. В 2014 году началась настоящая революция в строительной отрасли, так как был напечатан первый дом, что открыло новую главу в области строительных технологий.

2. Технология и материалы 3D печати

Идея 3D-печати родилась еще в 1983 году, когда Чарльз У. Халл выступил с идеей упрочнения настольных покрытий ультрафиолетовым излучением. Эта простая мысль привела его к изобретению стереолитографии, первой технологии 3D-печати. Стереолитография была первой технологией быстрого прототипирования, которая означает быстрое и точное воспроизводство элементов, обычно с компьютерной поддержкой. Первым шагом в создании технологии было изобретение добавок к синтетическим смолам, которые после осветления смол вызывали начало процесса полимеризации. Стереолитография – это технология, которая может создавать объекты с высокой точностью и чрезвычайно сложной геометрией, и именно поэтому она используется во многих областях, например, медицина, автомобиле- и самолетостроение, искусство и дизайн. Аналогичным методом 3D-печати является селективное лазерное спекание (SLS), при котором лазер используется для плавления вместе частиц порошка с целью создания объекта [2]. Материалы, используемые в технологии SLS, обычно имеют высокую прочность и гибкость. Самые популярные из них – нейлон или полистирол. Моделирование методом послойного наплавления FDM – это технология, которая была изобретена в 1988 году С. Скоттом Крапом. Пластичные материалы, которые затвердевают во время процесса охлаждения, экструдированы через сопло с двойной головкой. И материалы для моделирования, и вспомогательные материалы наносятся в соответствии со слоями поперечного сечения, созданными из цифровой модели. Сопло содержит резистивные нагреватели, которые поддерживают нить накала в соответствующей точке плавления, что позволяет ей легко протекать через сопло в случае формирования слоев. Как и в других технологиях, после создания одного слоя платформа опускается и создается следующий слой. Этот процесс повторяется до тех пор, пока весь объект не будет завершен. Материалы, обычно используемые в технологии FDM, называются нитями и

используются в принтерах в виде рулонов термопластичных материалов, таких как ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) или PLA (полимолочная кислота), которая представляет собой совершенно другой вид термопластов. Она сделана из кукурузного крахмала или сахарного тростника и является биоразлагаемой, поэтому считается более экологичной, чем ABS. За последние два десятилетия моделирование методом послойного наплавления стало самым популярным и широко используемым методом 3D-печати в мире. В течение последних десятилетий был разработан широкий спектр материалов, представляющих различные свойства и позволяющих расширить спектр применения, придавая отпечаткам внешний вид дерева (PLA с древесными волокнами), металла (PLA с бронзой), песчаника (PLA с молотым мелом).

3. Примеры применения 3D-печати в строительной индустрии

3.1. Canal House в Амстердаме

В 2014 году голландская проектная компания Dus Architects (Netherlands) решила построить дом, напечатав его детали гигантским принтером. В Европе это был первый проект, который планировали реализовать с помощью технологии 3D-печати. Проект под названием 3D print Canal House проходил в Амстердаме на протяжении трех лет. Архитекторы из Dus Architects хотели доказать, что, печатая компоненты дома прямо на месте, они смогут полностью избавиться от строительного мусора и минимизировать расходы на транспорт. Мобильность принтера считалась основным преимуществом, так как его можно транспортировать по всему миру, благодаря чему стоимость транспортировки материала и его хранения на строительной площадке, вероятно, понизится. Время проекта было оценено таким образом, чтобы позволить им изучить технологии печати и успеть разработать соответствующий материал. Строительная площадка открыта для общественности даже после завершения проекта, так

как основная его цель – поделиться обнаруженным потенциальным использованием 3D-печати в строительной отрасли [3].

Компоненты дома печатаются на гигантском 3D-принтере под названием KamerMaker. Техника печати очень похожа на большинство принтеров. Процесс запускается на компьютере, где в соответствующих 3D программах модели создаются и преобразуются в нужный формат. Термопластичный материал (который в данном конкретном случае является биоразлагаемым пластиком) нагревается принтером до тех пор, пока он не достигнет соответствующего жидкого состояния, когда его можно нанести при помощи насадки принтера. После того, как один слой завершен, другой слой наносится на предыдущий. На этой стадии процесса самым сложным для разработки является материал, который после изготовления принтером будет одновременно достаточно гибким для создания подходящих слоев, адгезивным, чтобы последующий слой соединялся с предыдущим и достаточно жестким, чтобы компонент мог сохранять свою форму.

3.2. Здания компании WinSun

WinSun Decoration Design Engineering (China) – китайское предприятие, работающее над материалом, похожим на бетон, который будет пригоден для использования в технологии 3D-печати. В 2014 году им удалось построить дома с использованием 3D-технологий. Эта технология основана на строительных компонентах, напечатанных как сборные элементы и собранных на месте. Компоненты печатаются на принтере высотой 6 метров, шириной 10 метров и длиной 40 метров. Принтер выдавливает материал (раствор) через сопло слой за слоем. Стены имеют диагонально армированную структуру с полостями, которые будут действовать как слой изоляции. Компоненты печатаются на принтере, а после печати они транспортируются на строительную площадку и собираются вместе для создания целой конструкции. Окна и двери были установлены в стенах

здания. После установки крыши были закончены отделочные и завершающие работы. Ориентировочная стоимость каждого здания составляет 4,800 долларов.

Спустя год после того, как китайский разработчик напечатал также пятиэтажное здание (рис. 1), используя ту же технику, что и для предыдущих домов, здание оставалось самой высокой конструкцией в мире, напечатанной в 3D до 2016 года.



Рис. 1 – Пятиэтажное здание, напечатанное на 3D-принтере.

3.3. Контурная обработка на месте

Наиболее перспективная технология 3D-печати, используемая в строительной отрасли, называется технологией Contour Crafting (CC). В этой технологии материал наливается постепенно слой за слоем, однако весь процесс происходит на месте. Этот метод дает прекрасную возможность автоматизации процесса строительства, при использовании 3D-принтера, который может напечатать весь дом непосредственно на месте. Основные преимущества, представленные Хошневисом [4], состоят в том, что процесс, выполняемый машиной, будет более безопасным, и, при использовании

соответствующего материала и при хороших параметрах принтера, это сократит его стоимость и время. 3D-печать также позволит создавать крупные компоненты с неограниченной архитектурной гибкостью и высочайшей точностью. Идея изобретателя состоит в том, чтобы создать принтер, который будет иметь одну или несколько форсунок, движущихся по двум параллельным дорожкам, установленным на строительной площадке. Следующая часть процесса такая же, как и в предыдущих технологиях: материал экструдирован через сопло и укладывается в форме пустых блоков с крестообразным рисунком внутри для обеспечения желаемой жесткости и прочности.

Существующим примером реализации технологии Contur Crafting является сад Энди Руденко, где ему удалось построить замок (рис. 2), используя технологию и программное обеспечение из проекта с открытым исходным кодом для печати 3D RepRap. Материал, использованный в принтере, представлял собой смесь цемента и песка. Все здание было напечатано за один проход, кроме башен, которые были напечатаны отдельно и собраны на месте [5].



Рис. 2 - Первая конструкция напечатанная на месте

3.4. Материальные проблемы в 3D печати строительных компонентов

Технология моделирования методом послойного наплавления, используемая в Canal House, требует разработки новых материалов. Поиск подходящего материала для этой технологии остается самой большой проблемой в строительных проектах с использованием 3D-технологий. В голландском проекте использовался термопластичный материал на биооснове, разработанный компанией Henkel (Germany). Тем не менее, на поздних этапах проекта Henkel проводил испытания с новым разработанным экобетоном, для повышения прочности на сжатие отпечатанных частей. Для этой фазы проекта были спроектированы строительные компоненты, легко соединяемые вместе, с зазорами внутри в виде сот для заполнения специальным легким бетоном, обеспечивающим изоляцию здания благодаря его воздухововлекающей структуре. Каждый элемент состоит из множества диагональных полых столбцов, которые будут поддерживать всю структуру. В доме напечатано 13 комнат, которые собраны в единое здание. Еще одним преимуществом здания является тот факт, что все его части также могут быть разобраны, в случае если дом будет необходимо переместить [3].

В китайском проекте WinSun для стереолитографической печати использовалась смесь промышленных отходов, стекловолокна, цемента и отвердителя. Разработанный материал позволил создавать строительные компоненты слой за слоем, как в обычной 3D-технологии. Желаемая смесь должна обладать максимальной обрабатываемостью, а также максимальной текучестью, чтобы ее можно было легко размещать в слоях. Слои должны обеспечивать сцепление с последующими слоями одновременно. Поскольку требуется прочность на сжатие, содержание воды должно быть минимизировано при сохранении соответствующей текучести [6]. Лучшее описание подходящего трехмерного цементирующего соединения было бы тиксотропным. Материал в жидком состоянии должен затвердеть в

надлежащее время и до укладки следующего слоя. Инженеры работают над поиском лучшего рецепта для быстрого схватывания бетона, который будет достаточно управляемым, чтобы выкачиваться из сопла принтера и быть таким же прочным, как железобетон.

Возможным материальным решением для 3D-печати строительных компонентов может быть серобетон, представляющий собой композитный материал, состоящий из серы и заполнителей (обычно крупнозернистого заполнителя из гравия или щебня и мелкого заполнителя, такого как песок). Смесь нагревают выше температуры плавления серы ок. 140 ° С [7]. После охлаждения бетон достигает требуемой прочности, без длительного процесса отверждения, как обычный бетон.

4. Подготовка компьютерных моделей для 3D печати

До сих пор мы обсуждали вопросы, связанные с физической частью производственного процесса. Это, конечно, ключевые вопросы для принятия технологии 3D-печати, однако важным элементом является также подготовка компьютерной модели для изготавливаемых деталей. К счастью, уровень компьютерной 3D-графики, как с точки зрения программного, так и аппаратного обеспечения, позволяет без особых трудностей создавать такие цифровые модели. Это может быть сделано с использованием многих коммерческих пакетов, а также пакетов с открытым исходным кодом.

4.1. 3D печать рабочего процесса

Типичный рабочий процесс для 3D-печати показан на рис. 3. Первым делом модель создается в приложении для 3D-моделирования. Затем она экспортируется в файл в общем формате обмена трехмерными данными. Для индустрии 3D-печати наиболее популярным форматом является STL (стереолитография), который обсуждается ниже. Затем для большинства технологий 3D-печати сохраненные данные обрабатываются для разложения модели на отдельные части. Таким образом, получается набор двухмерных

контурных линий, которые затем обрабатываются для генерации управляющих команд для позиционирования печатающей головки или лазерных лучей.

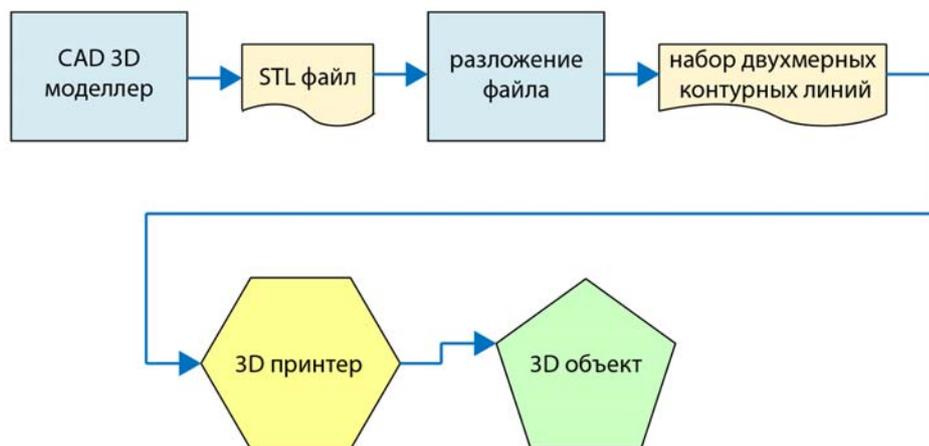


Рис. 3 - Типичный рабочий процесс для 3D-печати.

4.2. Формат данных STL

Передача данных модели через формат STL требует построения триангуляции всех граничных поверхностей, как показано на рис. 4. Это проще всего сделать, если сплошная модель строится с использованием В-Рер (границы), поскольку для этого представления сплошные границы хранятся внутри модели в явном виде. Ключевым элементом экспорта такого представления в формат STL является триангуляция криволинейных поверхностей. Для перевода моделей CSG (Computed Solid Geometry) в формат STL необходимы дополнительные шаги обработки для восстановления границ модели.

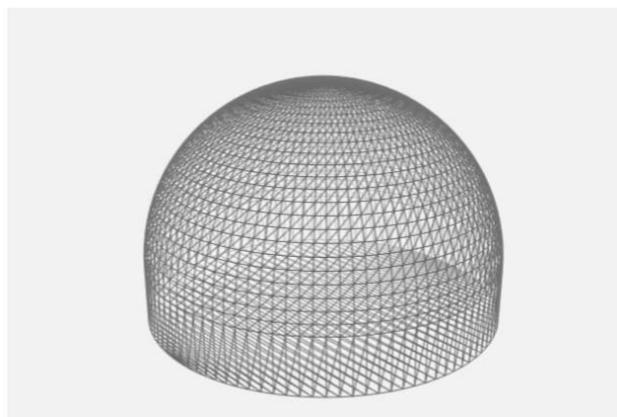
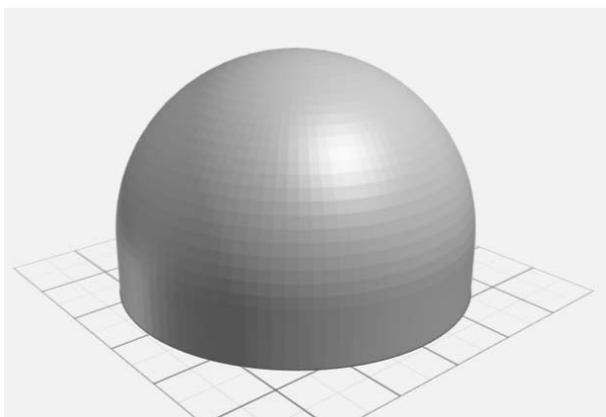


Рис. 4 – Пример модели и ее триангулярной структуры.

Хотя STL является популярным форматом ввода для 3D-печати, следует подчеркнуть, что сохранение модели в этом формате не является обязательным, и команды для управления процессом печати могут быть сгенерированы непосредственно из модели в ее собственном представлении. Это просто вопрос геометрических вычислений в геометрическом ядре 3D-принтера. Текущие форматы обработки и данных для геометрических моделей для 3D-печати имеют свои корни в компьютерной 3D-графике, используемой для визуализации на экране. Это может привести к некоторым трудностям и ограничениям при использовании цифровых моделей для печати, что обсуждается в следующем пункте. Стоит отметить, что, поскольку технологии аддитивного производства становятся зрелыми и позволяют производить очень сложные, нестандартные геометрические формы, также ведутся активные исследования новых геометрических представлений, которые непосредственно связаны с процессом осаждения физического материала [8]. Это позволит обойти обработку геометрии, которая подходит для визуализации экрана, но проблематична в случае 3D-печати.

4.3. Подготовка 3D моделей

Как сказано выше, в большинстве случаев для отправки цифровой модели на печать достаточно сохранить ее в формате STL. Многие программы 3D компьютерной графики могут экспортировать модели в STL. Однако следует использовать их осторожно, потому что многие из этих программ предназначены для использования в основном для визуализации 3D-моделей на экране. Это означает, что они могут допускать определенные особенности модели, которые не являются необходимыми для рендеринга, но будут иметь решающее значение для 3D-печати. Основные моменты, на которые следует обратить внимание:

1. 3D печать – физический процесс, противоположный отображению экрана. Таким образом, нужно соблюдать физические ограничения. При разработке модели для печати необходимо убедиться, что все элементы модели физически реализуемы. Это означает, например, что свободные одномерные ребра и двумерные грани не допускаются в модели для печати;
2. Печать выполняется при наличии силы тяжести. Нужно учитывать стабильность модели и вес ее частей, чтобы избежать повреждения печатных частей, например, из-за поломки тонких опорных элементов;
3. Некоторые технологии печати требуют проектирования отверстий, через которые может быть удалено избыточное количество материала;
4. Триангулированные поверхности должны образовывать двумерное многообразие. В частности, все ребра должны быть разделены ровно двумя гранями, и не должно быть особых точек, где граница модели касается самой себя.

4.4. Программное обеспечение

Autodesk Inventor – программное обеспечение, которое позволяет построить полную трехмерную модель проектируемой конструкции или устройства и создать планарную чертежную документацию для проекта. При использовании Inventor большую часть времени, которое нужно вкладывать в проект конструктору, жертвуют на творческие и концептуальные работы. Все изменения, сделанные в модели, автоматически переносятся на чертежи.

Blender – пакет с открытым исходным кодом для 3D-моделирования, анимации и компьютерных игр. Интересной особенностью Blender является модуль экспорта/импорта для моделей IFC на основе библиотеки

IfcOpenShell. Этот модуль позволяет импортировать и обрабатывать модели, подготовленные в приложениях BIM [9], таких как Revit или Tekla.

5. Выводы

Технология 3D-печати все еще молода и имеет много ограничений, но есть большие надежды на будущее 3D-печатных зданий и строительных компонентов. Разрабатываются универсальные структуры для 3D-принтеров и новых материалов, которые могут обеспечить различные свойства, например прозрачность, теплоизоляцию или прочность.

Концепция контурной обработки, позволяющая печатать дома на месте, может потребовать нового архитектурного подхода к проектированию зданий. Этот метод потребует разработки новых материалов, подходящих для процесса 3D-печати, учитывая и такие, в которых традиционные компоненты будут заменены экологически чистыми [10].

Создание зданий сложной формы может стать одним из самых больших преимуществ для большинства архитекторов. Их воображение сможет победить предыдущие препятствия, связанные с ограниченностью традиционных методов строительства. В настоящее время 3D-печать может трансформировать архитектуру, но тем не менее, этот метод должен быть разработан с учетом вопросов экологии как для выбора материала, так и для метода строительства.

Существует множество преимуществ, связанных с разработкой 3D-технологий в строительстве, и наиболее важными из них можно назвать следующие:

1. Более низкие затраты – стоимость печати строительных элементов домов значительно ниже традиционных методов строительства; транспортировки и хранения материалов на объектах;

2. Экологически чистые строительные процессы и использование сырья с низким потреблением энергии (т.е. строительные и промышленные отходы);
3. Сокращение количества травм и несчастных случаев, поскольку принтеры смогут выполнять самые опасные работы;
4. Экономия времени – время, необходимое для завершения строительства, может быть сокращено.

С другой стороны, все еще есть ряд проблем, которые необходимо учитывать. Неизвестно, займет ли разработка 3D-технологии печати рабочие места тысяч квалифицированных работников.

Пока трудно представить, что 3D-печать может заменить традиционные методы строительства в ближайшие несколько лет. Более вероятно, что в промышленности будут присутствовать обе технологии, и 3D-печать может развиваться наряду с традиционными методами, поддерживая их, особенно в случае более сложных строительных проектов.

Что касается программного обеспечения, важным вопросом будет обеспечение совместимости приложений, используемых в процессе архитектурного проектирования, структурного анализа и печати. Чтобы автоматизировать процесс строительства, чтобы управлять им и оптимизировать его, перевод цифровой модели и проверка ее пригодности для процесса печати должны выполняться с минимальным вмешательством человека, а наиболее желательно - полностью автоматически.

Литература

1. Фиговский О. Инновационный инжиниринг – путь к реализации оригинальных идей и прорывных технологий // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321



2. Gosselin C., Duballet R., Roux Ph., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morel Ph. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 2016, vol. 100, pp.102-109. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097

3. Dus Architects 3D PRINT CANAL HOUSE, 2016. URL: 3dprintcanalhouse.com/construction-technique

4. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 2004, vol. 13, pp.5-19. doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012

5. Rudenko A. 3D Concrete House Printer, 2016. URL: totalkustom.com

6. Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N. E., Hamzeh, F. 3D concrete printing: Machine and design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2015, vol. 6, pp.14–22.

7. Grugel R. N., Toutanjib H. Sulfur “concrete” for lunar applications - Sublimation concerns. *Advances in Space Research*, 2008, vol. 41, pp.103-112. doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.018

8. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 90–101. doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.08

9. Sakin M., Kiroglu Y. C. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp.702-711. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562

10. Кондратенко Т.О., Сайбель А.В. Оценка воздействия строительного производства на окружающую среду // Инженерный вестник Дона, 2012, №4(2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1298



References

1. Figovskij O. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321
2. Gosselin C., Duballet R., Roux Ph., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morel Ph. Materials & Design, 2016, vol. 100, pp.102-109. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097
3. Dus Architects 3D PRINT CANAL HOUSE, 2016. URL: 3dprintcanalhouse.com/construction-technique
4. Khoshnevis B. Automation in Construction, 2004, vol. 13, pp.5-19. doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012
5. Rudenko A. 3D Concrete House Printer, 2016. URL: totalkustom.com
6. Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N. E., Hamzeh, F. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2015, vol. 6, pp.14–22.
7. Grugel R. N., Toutanjib H. Advances in Space Research, 2008, vol. 41, pp.103-112. doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.018
8. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2017. – T. 8, № 1. – S. 90–101. doi.org/10.15593/2224-9826/2017.1.08
9. Sakin M., Kiroglu Y. C. Energy Procedia, 2017, vol. 134, pp.702-711. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562
10. Kondratenko T.O., Sajbel' A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4(2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1298