

## Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: [www.unistroy.spbstu.ru](http://www.unistroy.spbstu.ru)



### 3D-печать в строительстве

Н.И. Ватин <sup>1</sup>, Л.И. Чумадова <sup>2</sup>, И.С. Гончаров <sup>3</sup>, В.В. Зыкова <sup>4\*</sup>, А.Н. Карпеня <sup>5</sup>, А.А. Ким <sup>6</sup>,  
Е.А. Финашенков <sup>7</sup>

<sup>1-7</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Информация о статье	История	Ключевые слова
научная статья	Подана в редакцию 28.10.2016	3D-печать; здания и сооружения; строительство; энергоэффективность; аддитивные технологии; цифровые фабрики; 3D-принтеры;
<b>УДК 691.4</b>		
<b>doi 10.18720/CUBS.52.3</b>		

#### АННОТАЦИЯ

Данная статья содержит обзор мирового опыта в области применения аддитивных технологий в строительной сфере. Использование 3D-печати позволяет воплотить в жизнь архитектурные проекты любой сложности, уменьшить количество производственных отходов, сократить дефицит жилого фонда, снизить материальные, энергетические и трудовые затраты на строительство. В статье рассмотрены основные технологии, которые используются для печати зданий и сооружений, их отличительные особенности. Также изучен вопрос о материалах, применяемых для изготовления строительной смеси. Особое внимание уделено оценке современного состояния 3D-печати в мире. Проведён обзор строительных компаний, производителей оборудования и исследовательских центров, которые являются основными участниками рынка. Основными задачами исследования являются: популяризация аддитивных технологий в России, способствование внедрению инновационных методов строительства, а также созданию нормативных документов, регламентирующих производственную деятельность

#### Содержание

1. Введение	28
2. Обзор литературы	28
3. Строительные аддитивные технологии	28
4. Анализ применяемых составов	31
5. Основные компании на рынке строительной 3D-печати	33
6. Заключение	37

#### Контакты авторов:

- 1 +7(921)9643762, [vatin@mail.ru](mailto:vatin@mail.ru) (Ватин Николай Иванович, д.т.н., профессор)
- 2 +7(921)7609300, [chumadova.2011@mail.ru](mailto:chumadova.2011@mail.ru) (Чумадова Людмила Ивановна, канд. техн. наук, доцент)
- 3 +7(921)9670522, [9670522@mail.ru](mailto:9670522@mail.ru) (Гончаров Иван Сергеевич, аспирант)
- 4\* +7(981)8564352, [veraverazyk@gmail.com](mailto:veraverazyk@gmail.com) (Зыкова Вера Владимировна, студент)
- 5 +7(968)1938742, [sah4akyc@gmail.com](mailto:sah4akyc@gmail.com) (Карпеня Александр Николаевич, студент)
- 6 +7(967)9740965, [Kimtox777@gmail.com](mailto:Kimtox777@gmail.com) (Ким Антон Александрович, студент)
- 7 +7(981)8469808, [finashenkov.brazas@gmail.com](mailto:finashenkov.brazas@gmail.com) (Финашенков Евгений Александрович, студент)

## 1. Введение

С начала XX века автоматизация производства растет почти во всех сферах. Внедрению автоматизации в строительную отрасль мешал конструктивный подход, значительно меньшее количество готовой продукции по сравнению с другими отраслями, а также экономическая непривлекательность дорогостоящего оборудования и ограничения в материалах [1], которые поддаются автоматизированному производству. Строительная отрасль сегодня сталкивается с такими серьезными проблемами, как низкая производительность труда, высокая статистика аварийных ситуаций на строительных площадках, сложность контроля строительных процессов, недостаток квалифицированных рабочих [2]. Очевидно, что строительная отрасль является одним из крупнейших потребителей невозобновляемых ресурсов и природных материалов по всему миру [3]. Аддитивные технологии расширили горизонты для многих динамично развивающихся направлений производства. 3D-печать позволила недавно разработанным в лабораторных условиях технологиям выйти на новый уровень. Аддитивные технологии (от английского Additive manufacturing) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом добавления материала [4]. Технологии послойного синтеза могут стать прорывом для конструкций, изготавливаемых из материалов на основе цемента.

Существенным препятствием для широкого внедрения в нашей стране аддитивных технологий является отсутствие базы национальных стандартов для аддитивного производства, в частности, по общей и специальной квалификации материалов, конструкциям, технологиям, оборудованию, контролю качества, контролю свойств и порядку применения изделий аддитивного производства. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии выпустило приказ от 1 сентября 2015 г. № 1013 "О создании технического комитета по стандартизации "Аддитивные технологии" [5]. Основным тезисом является концентрация и координация усилий в направлении создания комплексного подхода развития аддитивных технологий, включая соответствующие системы национальных стандартов (классификацию материалов, требования к качеству исходного сырья, конструкции, технологии, оборудованию, унификацию форматов компьютерных моделей).

Для применения аддитивных технологий в строительстве требуются разработки и изучение новых материалов, используемых в 3D-печати. Однако многие разработчики сталкиваются с проблемой подбора материалов. Фундаментальные соотношения концепции индустрии 4.0 (конструкция – материал – технология) еще не интегрированы в строительную сферу. В данной статье рассмотрен мировой опыт исследования и применения строительных материалов на основе бетонных смесей, использующихся для строительных аддитивных технологий, а также свойства этих смесей и отдельных компонентов. Также в статье представлен обзор существующих строительных технологий трёхмерной печати, исследуемых и внедряемых по всему миру.

## 2. Обзор литературы

Термину аддитивные технологии уже более 2-х десятков лет. Еще в 1986 г. был запатентован аппарат для создания трехмерных объектов с помощью стереолитографии [6]. На сегодняшний день аддитивные технологии применяются во многих отраслях производства от машиностроения до кулинарии [7-14]. Оценки уровня развития послойного синтеза за последнее десятилетие даны в трудах многих исследователей [15-17].

В настоящее время наблюдается отказ от общепринятых концепций в области строительства, и современные направления ориентированы именно на аддитивные технологии возведения [18]. Научные изыскания, направленные на решение проблем строительной 3D-печати, ведутся во многих институтах по всему миру. Имеется ряд патентов на строительные смеси для принтеров [19-22]. Помимо материалов, патентуются так же принтеры и технологии печати [23-25].

## 3. Строительные аддитивные технологии

На сегодняшний день, аддитивные технологии, прошедшие путь от 3D-печати макетов и быстрого прототипирования к изготовлению готовых изделий для различных отраслей промышленности, привлекают все больше и больше инвестиций. Рост интереса к аддитивным технологиям обуславливается множеством факторов: высокий уровень автоматизации производства, улучшение качества продукции, ускорение процессов создания, возможность оптимизации CAD моделей, уменьшение отходов производства [26-30]. Данные факторы являются основой для успешного перехода к концепции «цифровых фабрик» будущего [31, 32]. Эта революция предусматривает цифровую технологию проектирования, изготовления, испытания, а также аддитивное производство деталей и изделий в целом.

По методам формирования слоя различают два типа аддитивных технологий: Bed Deposition и Direct Deposition [7].

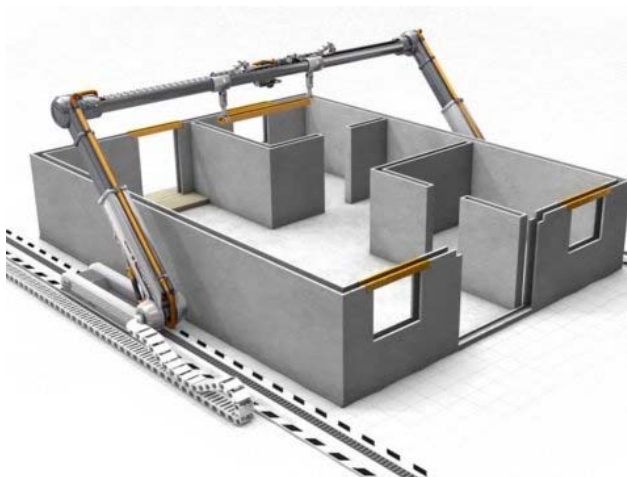
Bed Deposition – класс технологий, при котором на рабочее пространство наносится слой порошкового материала. Формирование изделия происходит послойно с помощью источника тепла: лазера (SLM), электронного луча (EBM) или света (DLP, SLA) или вспомогательного вещества (Binder Jetting), в соответствии с текущим сечением CAD модели. Остатки порошка удаляются, рабочая платформа смещается и процесс повторяется [33].

Direct Deposition – способ формирования, при котором материал подается непосредственно в место построения в соответствии с CAD моделью [33].

Как отмечено в [34], изготовление опалубки составляет от 35 до 60 % от общей стоимости бетонных конструкций. Возможность строительства бетонных конструкций без опалубки является важным преимуществом с точки зрения снижения затрат, скорости производства и архитектурной свободы, а также облегчения установки инженерных коммуникаций [35,36]. Аддитивные технологии относятся к классу, так называемых зелёных технологий, так как предполагают почти безотходное производство. Высокая автоматизация и роботизация процесса позволяет реализовывать проекты в агрессивных средах [37], не подвергая опасности здоровье персонала.

Одним из первых, кто предложил идею о постепенной автоматизации строительного процесса, являлся профессор кафедры машиностроения Стэнфордского университета Джозеф Пенья [38]. Именно он предложил использовать материалы на основе цемента для аддитивного подхода к строительству [39]. Берох Хошневис, профессор из Университета Южной Калифорнии, предложил идею реализации строительной 3D-печати. В середине 1990-х годов он предложил инновационную технологию Contour Crafting (CC) [40].

Contour Crafting (CC) – одна из аддитивных строительных технологий, способная применяться в строительстве крупномасштабных объектов (рис. 1) [40]. Как утверждает Берох Хошневис, CC может позволить печатать несколько зданий за прогон [41]. В качестве материалов могут быть использованы: полимеры, керамический шликер и бетон. В процессе экструзии материала за счет шпателей, установленных на подающем сопле, образуется ровная поверхность [42]. Высота слоя ограничивается размерами мастерков, кроме того она должна быть подобрана таким образом, чтобы при укладке верхних слоев предыдущие слои начинали схватываться и имели достаточную несущую способность. В технологии Contour Crafting предусматривается возможность проектирования инженерных коммуникаций в полостях стен, а также при использовании специального оборудования, закрепленного на раме, можно автоматизировать работы по их прокладке [43].



**Рисунок 1. Установка Contour crafting, США**

Спустя некоторое время после анонса CC Хошневисом, всему миру была представлена другая технология, которая получила название Concrete Printing (CP). Данная технология была впервые представлена в 2009 году в университете Лафборо Ричардом Басуэллом и его коллегами для демонстрации ее потенциальных возможностей [44]. С тех пор у данной технологии в строительстве появилось множество приверженцев, и на это есть свои причины [45]. Данный способ аналогичен технологии CC, то есть основан на послойном экструдировании строительной смеси. Основным отличием от CC является то, что в методе CP на экструдере отсутствуют шпатели (рис. 2), что дает возможность выполнять еще более геометрически сложные контуры. [46] Именно благодаря этой особенности данный

метод выглядит самым перспективным в строительстве, так как создание зданий и сооружений уникальных форм становится все более приоритетным и востребованным направлением в данной сфере [47]. Недостатком является тот факт, что из-за отсутствия шпателей на экструдере появляется необходимость обработки поверхности напечатанного сооружения [48].



**Рисунок 2. Процесс построения по технологии Concrete Printing**

Принципиально отличающейся технологией в строительном аддитивном производстве является D-Shape. Технология D-Shape является изобретением компании Энрико Дини, главой компании "Monolith UK" [24].

Процесс печати с использованием данной технологии условно делится на 3 этапа:

- создание 3D-модели объекта,
- построение объекта,
- финальная обработка объекта.

В отличие от методов, описанных выше, экструдер подает не готовую строительную смесь, а клеящее вещество на песок или другой материал, представляющий собой порошок. На этапе печати объекта слой порошка толщиной 5-10 мм равномерно наносится на область печати. Затем, на эту поверхность подается клеящее вещество [43]. После этого наносится еще один слой порошка необходимой толщины, и процесс повторяется до завершения печати. В конце слой порошка, который являлся опорным, удаляется, а поверхность объекта шлифуется и полируется. Таким образом, процесс практически идентичен технологии Binder Jetting [49]. Отличным примером возможностей технологии D-Shape служит скульптура “Радиолярия”, напечатанная еще в 2009 году (рис.3) [50]. Материалом для скульптуры послужил искусственный песчаник, а в качестве клеящего вещества выступал раствор с добавлением оксида магния [51]. Полученный материал оказался достаточно прочным, чтобы выдержать вес всей конструкции и был абсолютно безвреден для окружающей среды [52].



**Рисунок 3. Скульптура “Радиолярия”, изготовленная по технологии D-Shape**

Благодаря тому, что все материалы являются натуральными и подвергаются лишь незначительной обработке, конечный продукт печати выглядит очень естественно [53]. На данный момент рассматривается возможность использования данной технологии для печати из лунного камня – реголита. Ожидается, что при положительных результатах исследований в этой области технологию D-Shape можно будет использовать для печати сооружений в космосе [54].

Основным недостатком для применения данной технологии именно в строительстве является то, что она позволяет печатать только объекты небольших размеров. Данное ограничение связано со свойствами песка и ему подобных материалов, используемых для печати. Таким образом, можно заключить, что данная технология лучше подходит для печати различных декоративных элементов, чем для возведения зданий и сооружений.

Стоит отметить, что одной из серьезных проблем, препятствующих широкому распространению технологий, основанных на способе Direct Deposition (CC и CP), является недостаток материалов, отвечающих заданным требованиям.

#### **4. Анализ применяемых составов**

В настоящее время используется широкий спектр материалов для аддитивных технологий: различные полимеры и резины, порошки сталей, сплавов титана, никеля, алюминия, меди, а также инструментальные и конструкционные керамики, биосовместимые и нанопропрочненные композиты. Большая часть этих материалов применяется для машиностроения, авиа- и автомобильной промышленности, изготовления товаров широкого потребления и медицинского назначения. Отдельного внимания заслуживает прорыв технологий трёхмерной печати в области изготовления эндопротезов и экзоскелетов. Однако в строительстве аддитивные технологии ещё не получили широкого применения и, соответственно, применяемые материалы находятся в стадии разработки.

Команда из Чаттануги, штат Теннесси, работает по технологии Бранч: быстро движущийся робот строит леса из ABS пластика, армированного углеродным волокном. Конструкция может иметь сложную архитектурную форму. После доставки на строительную площадку она дополняется традиционными строительными материалами, - бетоном, штукатуркой, монтажной пеной с использованием тех же инструментов, которые строители используют сегодня. Однако данная технология пока не позволяет строить несущие стены и ответственные сооружения.

Цементные составы, которые твердеют длительное время не могут удовлетворить требованиям производительности 3D-печати [19]. Состав должен быть тиксотропным, то есть уменьшать вязкость от механического воздействия и увеличивать вязкость в состоянии покоя. Возможное решение для строительной печати – сернистый бетон, который представляет собой композитный материал, изготовленный из серы и заполнителя. Смесь нагревают выше температуры плавления серы. После охлаждения бетон достигает заданной прочности без длительного твердения [55].

Обычный цемент на основе бетона не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для строительной 3D-печати [56]. Для оптимизации процесса трехмерной печати должны быть учтены два условия. Во-первых, сила сцепления между слоями уменьшается с увеличением временного промежутка между слоями [35]. Во-вторых, материал должен затвердеть достаточно, чтобы выдержать вес впоследствии осажённых слоев без деформации. Потребность в выдерживании ранее напечатанных слоев замедлит возведение здания. Сопоставление этих двух ограничений приводит к парадоксу оптимизации скорости печати. Временной интервал между двумя осажёнными слоями должен быть достаточно длинным, чтобы обеспечить необходимую прочность, но также небольшим для обеспечения прочного сцепления между слоями [57].

Способность осажённых слоев нести свой собственный вес прямо пропорционально зависит от предела текучести [51, 58]. При послойном возведении стены первый осажённый слой подвергается максимальной нагрузке. Для того, чтобы обеспечить стабильность стенки во время этого процесса, предел текучести должен быть достаточным, чтобы выдержать эту нагрузку. С другой стороны, смесь должна быть достаточно жидкой для экструзии [59]. Для наращивания структуры необходимо обеспечить достаточную текучесть при экструзии и стабильность после нанесения слоя. Предел текучести материалов на основе цемента возрастает со временем в состоянии покоя [60-67].

Группой французских ученых было доказано [58], что изменение предела текучести имеет линейный характер (модель Руссель) [63] в течение первых 40 мин, для более длительного периода увеличение текучести лучше описывает модель Перро и др. [68]. Для экспериментов ученые подобрали следующую смесь: 50% цемента, 25% известняка и 25% метакаолина. Водоцементное соотношение составило 0,41. В качестве суперпластификатора был использован поликарбоксилат, его отношение к массе цемента равно

0,3%. Начальный предел текучести материала оказался довольно большим и составил 4 кПа, что лежит в диапазоне предела текучести материала, разработанного в университете Южной Калифорнии для технологии Contour Crafting [69-70].

Добавление известняка в качестве наполнителя повышает прочность материала на сжатие и изгиб, а также улучшает удобоукладываемость бетона [71, 72], что особенно ценно при экструзии бетона.

Метакаолин улучшает свойства растворов и бетонов. Мелкие частицы, которые могут помещаться между цементными зернами, придают составу пастообразную структуру, которая в свою очередь уменьшает водоотделение и приводит к более однородной микроструктуре. Метакаолин при введении его в цемент повышает прочность и долговечность [73]. Кроме того, частичная замена цемента метакаолином в цементном растворе и бетоне снижает объем пор [74], что способствует повышению морозостойкости [75].

Время пластифицирующего действия поликарбоксилатов увеличено в 3-4 раза по сравнению с сульфомеланиновыми, сульфонафталиновыми формальдегидами или лигносульфонатами [76]. Это позволяет не только повысить подвижность бетонной смеси в ранние сроки, но и сохранять ее в течение большего периода времени [77], что положительно сказывается на увеличении времени, когда смесь может подаваться через экструдер.

В последнее время ученые университета Лафборо уделяли особое внимание подбору и изучению свойств бетонных смесей для 3D-печати [51, 57, 78]. Команда исследователей продемонстрировала полномасштабную конструкцию размером 1 x 2 x 0,8 м под названием «Чудесная скамейка» (Wonder Bench). Для скамьи была специально разработана бетонная смесь, способная к легкой перекачке насосом и экструдированию, кроме того полученная структура должна быть способна нести нагрузку. Состав смеси полностью не раскрыт, однако массовое соотношение представлено: 54% песка, 36% химически активных цементных соединений и 10% воды. Как отметили исследователи, прочность полученного материала составила 95% от прочности обычного бетона [78].

Также британские ученые занимались проектированием состава бетона со свойствами, пригодными для высокопроизводительной печати. В [51] описан оптимальный состав, который включает песок и вяжущее вещество в соотношении 3:2, причем последнее включает в себя 70% цемента, 20% золы уноса, 10% микрокремнезема; а также 1,2 кг полипропиленовых волокон на 1 м<sup>3</sup>. Водоцементное соотношение составляет 0,26. Суперпластификатор и замедлитель схватывания добавлены в дозировках 1 и 0,5% соответственно по массе.

Включение микрокремнезема в состав бетона приводит к более плотной структуре бетона, повышению прочности на изгиб, уменьшению проницаемости структуры [79]. Положительные взаимодействия между полипропиленовыми волокнами и золой уноса приводят к низкой усадке бетона при высыхании. Тем не менее, полипропиленовое волокно снижает удобоукладываемость бетона [80], но суперпластификатор позволяет сделать смесь достаточно пластичной для экструдирования.

Описанная выше смесь была напечатана через сопло диаметром 9 мм с последовательным нанесением в 61 слой в одной сессии без заметной деформации нижних слоев. Время живучести смеси достигает 100 мин. Прочность на сжатие бетона превышает ожидаемый, составляя 110 МПа в возрасте 28 дней [51].

В прошлом году исследователи из Американского Университета Бейрута в Ливане подобрали хорошо экструдированную смесь необходимой прочности для 3D-печати объектов строительной отрасли. Экспериментирование на различных смесях показало, что оптимальное сочетание для достижения результата состоит из 125 г цемента, 80 г песка и 160 г мелкого заполнителя с водоцементным отношением 0,39 с добавлением 1 мл суперпластификатора и 0,625 мл замедлителя схватывания для оптимизации производительности печати. Прочность на сжатие такой смеси составляет примерно 42 Мпа [81].

Китайская компания Winsun, занимающая одну из лидирующих позиций в области 3D-печати, успешно применяет стойкий к истиранию состав Crazy Magic Stone, прочность которого в 4-5 раз превосходит прочность природного камня. Высокие механические характеристики обусловлены наличием обработанного кварцевого песка и специальной фибры. Winsun также широко используют гипс с добавлением стекловолокна (Glass Fiber Reinforced Gypsum). GFRG содержит 3-25% фибры длиной от 1 до 13 см и диаметром от 5,8 до 100 мкм. Водогипсовое соотношение лежит в пределах от 0,25 до 0,60 [82,83]. Стекловолокно повышает сопротивление состава к трещинообразованию, делает его более пластичным и удобоукладываемым. В композитах с использованием стекловолокна растягивающие напряжения воспринимают на себя фибра, что существенно повышает сопротивление такого материала растяжению и изгибу [84,85,86].

Подтверждением актуальности рассматриваемой темы служит неутихающий интерес к вопросу составов для 3D-печати, во многих странах уже ведутся разработки, позволяющие использовать 3D-печать для возведения зданий и сооружений. На сегодняшний день ряд компаний достигли определённого успеха.

## 5. Основные компании на рынке строительной 3D-печати

На сегодняшний день существует множество проектов, направленных на развитие аддитивных строительных технологий. Ранее упомянутая китайская компания Winsun уделяет большое внимание совершенствованию технологий печати и модернизации строительных 3D принтеров, так как стремится упрочить своё лидерство на мировой арене. В качестве демонстрации своих возможностей, в 2014 г. компания Winsun напечатала 10 одноэтажных домов за 24 часа. Год спустя на выставке в промышленном парке Сучжоу, в провинции Цзяну, китайские инженеры представили сразу 2 проекта: пятиэтажное жилое здание, которое по праву считается самым высоким зданием, построенным по технологии 3D-печати и двухэтажная вилла, площадью 1100 м<sup>2</sup> (рис. 4). Весной 2016 года Winsun представила «офис будущего», изготовленный по аддитивной технологии в городе Дубай, Объединенных Арабских Эмиратов (рис. 5).



Рисунок 4. Объекты, представленные компанией Winsun на выставке в Сучжоу



Рисунок 5. «Офис будущего» в ОАЭ

Total Kustom – это организация, базирующаяся в Миннесоте, США, основанная российским инженером Андреем Руденко. Он самостоятельно разработал конструкцию принтера, аналогичного технологии Concrete Printing. Его изобретение предназначено для возведения малоэтажных строений площадью до 200 м<sup>2</sup>. Скорость печати варьируется в зависимости от условий выполнения работ, навыков оператора, сложности 3D-модели, и, в среднем, составляет 48 часов для конструкции высотой 3 м, площадью 100 м<sup>2</sup>. Прежде чем приступить к реализации коммерческих проектов, Андрей Руденко в течение нескольких лет работал над демонстрационной моделью – бетонным замком (рис. 6). За это время он модернизировал конструкцию принтера, отработывал технологию печати, подбирал оптимальный состав бетонной смеси. После этого, команда Total Kustom осуществила проект по возведению номера в Lewis Grand Hotel в Филиппинах (рис.7). Он считается первым коммерческим строительным объектом, созданным с помощью 3D-печати.



Рисунок 6. Замок, напечатанный Андреем Руденко



Рисунок 7. Процесс строительства номера в Lewis Grand Hotel

Российские инженеры также работают над технологией строительной 3D-печати. Так, Никита Чен-юн-тай разработал мобильный строительный 3D-принтер APIS COR (рис. 8). Его изобретение принципиально отличается от конкурентов. APIS COR способен выполнять печать сооружения «изнутри», благодаря своей уникальной конструкции. Оставаясь на одном месте, 3D-принтер APIS COR может возводить слой за слоем стены из бетонной смеси. Дисперсное армирование качественно улучшает механические характеристики бетонов, а также позволяет сократить рабочее сечение конструкции и в ряде случаев отказаться от использования стержневой арматуры или уменьшить ее расход [87]. Совместно с русско-итальянской компанией «Renka Rus», инженеры APIS COR изучают возможность применения для строительства геополимерных материалов, которые являются более экологичными [88].



Рисунок 8. Принтер APIS COR

Российская компания «СПЕЦАВИА», занимающаяся производством станков ЧПУ для металлообрабатывающей отрасли, разработала оборудование, предназначенное для строительной 3D-



печати (рис. 9). Их продукция по типу относится к порталным принтерам, т.е. для его функционирования необходима система направляющих, обеспечивающих передвижение [89]. На данный момент производятся принтеры нескольких модификаций. Компания ведёт разработки по расширению применяемых составов, увеличению рабочего поля.

Специально для «СПЕЦАВИА» компаниями-партнёрами было разработано более 15 составов, используемых для печати. Компания «СПЕЦАВИА» предлагает следующие варианты исходного материала:

- каолиновая смесь,
- стеклофибробетон,
- цементная смесь М300 с минеральными добавками,
- мелкодисперсная цементная смесь,
- высокопрочная цементная смесь.



**Рисунок 9. Строительный 3D-принтер S-4063**

Компания Monolite UK разработала и запатентовала установку, работающую по технологии Binder Jetting для строительства зданий. Она состоит из жесткой рамы, большой плоской платформы и настраиваемой печатающей головки, вмещающей до 300 сопел. CAD-CAM программное обеспечение управляет механизмом в процессе строительства, производя сканирование по всей поверхности и осаждение связующего вещества.

Созданный в 2007 году оригинальный принтер стал первым в мире масштабным струйным принтером, использующим 3D-технологии печати (рис. 10).



**Рисунок 10. D-Shape принтер**

Принтер использует специальное связующее и обычный песок (измельченный доломитовый известняк) в качестве единственного сырья. Песок смешивают с твердым катализатором, и затем полученную смесь подвергают воздействию жидкого связующего вещества. Излишек песка может быть повторно использован для следующей печати.

Компания использовала свою технологию для создания искусственных рифов, защитного укрепления для миротворческих войск, одноэтажного дома и уличной мебели, а также для создания уникальных объектов ландшафтной архитектуры. Нынешний президент компании Адам Кушнер добился разрешения на строительство недвижимости в США, и в данный момент разрабатывается проект по созданию апартаментов в Нью-Йорке.

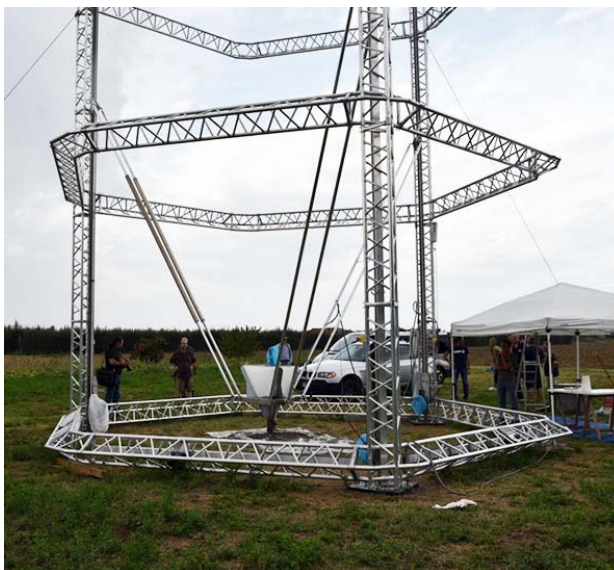
Архитектурная компания DUS напечатала небольшой домик объемом 25 м<sup>3</sup> в заброшенной промышленной зоне Амстердама (рис. 11). Создатели продемонстрировали возможность быстрой 3D-печати убежищ в зонах стихийных бедствий или в случаях других экстренных ситуаций.



Рисунок 11. Urban Cabin

Конструкция выполнена из биоразлагаемого пластика на основе льна – материала, разработанного совместно с концерном Henkel. Постройка имеет сотовую конструкцию, что позволяет добиваться достаточной прочности при минимальных материальных и временных затратах. Подобные жилища не планируется делать постоянными. Использованный пластик можно раздробить и превратить в материал для новых проектов [26]. Для изготовления домика был использован 3D-принтер собственной разработки под названием «KamerMaker» – устройство высотой в три с половиной метра, уместяющееся в обычный транспортный контейнер. Такая концепция более ограничена по размерам готовых изделий, чем системы, использующие роботизированные манипуляторы, но создатели решили отдать предпочтение стабильности и более высокому качеству. 3D-печать крупных построек остается возможной, но по частям. Легкая сотовая конструкция позволяет размещать постройку в нужном месте с помощью небольшого крана или даже вручную. В случае необходимости можно залить фундамент и пол, однако разработчики считают, что при использовании дизайна по назначению такие меры будут излишними.

World's Advanced Saving Project (WASP) – это проект, созданный командой итальянских исследователей и инженеров, направленный на разработку технологии 3D-печати. WASP производит профессиональные принтеры с целью стимулирования развития и внедрения этой технологии, налаживания процессов производства для решения проблемы энергоэффективности, которая особа актуальна в современном мире. WASP разработали строительный принтер Big Delta высотой 12 м (рис. 12) [90].



**Рисунок 12. Принтер Big Delta**

Одной из задач WASP является возведение конструкций из материалов, которые можно добыть в регионе строительства. Для осуществления этой цели требуется мобильный механизм с низким энергопотреблением. Несмотря на внушительные размеры, для его установки требуется около одного часа, более того, для питания принтера могут использоваться солнечные панели. Благодаря вращающемуся соплу, материал не только выдавливается, но и смешивается на выходе что делает его более сплошным. Также WASP разработали новую конструкцию экструдера, который способен втягивать излишек экструдированного материала. Главным проектом WASP является экологически чистый поселок с низким потреблением энергии, который носит название «Шамбала». Основным строительным материалом является смесь на основе почвы и соломы с добавлением песка и извести [91].

## 6. Заключение

Аддитивные технологии в промышленности на сегодняшний день уже достаточно распространены. Однако строительная отрасль является весьма консервативной и отстает в плане применения 3D-печати от других производств.

Внедрение аддитивных технологий в процесс возведения зданий и сооружений – процесс, требующий значительную долю НИОКР, однако, помимо университетов и научных групп, в данной области ведут свои разработки и крупные компании, интерес которых очевиден – 3D-печать зданий может кардинально изменить рынок недвижимости и смежных отраслей.

Основными проблемами, решение которых позволит обеспечить серьезное развитие аддитивных строительных технологий, являются:

- отсутствие нормативной базы,
- необходимость развития рынка строительных материалов для 3D-печати,
- высокая стоимость оборудования, связанная с отсутствием производства крупных серий.

Несмотря на то, что исследованиями и разработками аддитивных строительных технологий занимаются крупные мировые институты и большие корпорации, имеется большой потенциал научных исследований в данной области и применения их на практике.

### Литература

- [1]. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. 2013. С. V009T10A062-V009T10A062.
- [2]. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects. Journal of Construction Engineering and Management. 1998. No.124(1). Pp. 31-41.
- [3]. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. Sustainable Cities and Society. 2016. No.23. С. 78-93.

- [4]. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: Учебн. пособие. СПб.: СПбГУ, 2013. 221 с.
- [5]. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 сентября 2015 г. N 1013 "О создании технического комитета по стандартизации "Аддитивные технологии" [Электронный ресурс]//Информационно-правовой портал Гарант.ру. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71074904/> (дата обращения 27.09.2016)
- [6]. Hull C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography : пат. 4575330 США. 1986.
- [7]. Chen L. et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. С.1-10.
- [8]. Вальтер А. В. Послойный синтез армированных объемных изделий //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. Т.2. №.12.
- [9]. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №. 5. С.7-17.
- [10]. Gálvez J. A. Not Just a Pretty Face: Three-Dimensional Printed Custom Airway Management Devices. 3D Printing and Additive Manufacturing. 2016. Т.3. No. 3. С.160-165.
- [11]. Barazanchi A. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. Journal of Prosthodontics. 2016.
- [12]. Kumar L. J., Nair C. G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Springer Singapore. 2016. С.39-54.
- [13]. Kreiger M. A., MacAllister B. A., Wilhoit J. M., Case M. P. The current state of 3D printing for use in construction. The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. Ames. Iowa. 2015. С.149-158.
- [14]. Huang S. H. Liu P., Mokasdar A., Hou, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Т.67. №.5-8. С.1191-1203.
- [15]. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering. 2012. Т. 2012
- [16]. Küchler S. Additive Technology and Material Cognition: A View from Anthropology. Journal of Cognition and Culture. 2014. Т.14. №.5. С.385-399.
- [17]. Herderick E. D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future. JOM. 2016. Т.68. No. 3. С.721-723.
- [18]. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. 2016. Т.11. №.3. С.209-225
- [19]. L. Xi-Qiang, L. Jing-Fang, Z. Tao, H. Liang, Z. Nan, L. Juan, L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: пат. CN104310918A. 2014
- [20]. Y. Tianrong, L Qiaoling. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: пат. CN104891891A. 2015
- [21]. F. Peng, M. Xinmiao. Fiber reinforced composite material reinforced 3D (three-dimensional) printing structure: пат. CN104309126A. 2014
- [22]. L. Fu-Cai, W. Yi-Yuan, X. Min, L. Bin, Z. Xin-Zhen, H. Ming. High-performance powder concrete for 3D (three-dimensional) printing: пат. CN104961411A. 2015.
- [23]. Khoshnevis B. Contour crafting extrusion nozzles: пат. US14/961,071. 2015.
- [24]. Dini E. Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor : пат. US8337736. 2012.
- [25]. Dini E., Chiarugi M., Nannini R. Method and device for building automatically conglomerate structures : пат. 11/908,993 США. 2006.
- [26]. Campbell T., C. Williams, O. Ivanova. Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC. 2011.
- [27]. Kobryn P. A., Semiatin S. L. The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V. JOM. 2001. Т. 53. No. 9. С. 40-42.
- [28]. Brennan-Craddock J. et al. The design of impact absorbing structures for additive manufacture. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012. Т. 382. №. 1.
- [29]. Klammert U. et al. Cytocompatibility of brushite and monetite cell culture scaffolds made by three-dimensional powder printing. Acta Biomaterialia. 2009. Т. 5. No. 2. С. 727-734.
- [30]. Lim S. et al. Fabricating construction components using layered manufacturing technology. Global Innovation in Construction Conference. 2009. С. 512-520.

- [31].Horbach S. et al. Building blocks for adaptable factory systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011. Vol. 27. No. 4. C. 735-740.
- [32].Müller E. Building Blocks as an Approach for the Planning of Adaptable Production Systems. *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. C. 37-45.
- [33].Gibson I., Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2010. T.238.
- [34].Johnston, W. D. Design and Construction of Concrete Formwork. E. G.. Nawy (ed.), *Concrete Construction Engineering Handbook*. CRC Press, 2008. 7-1–7-49.
- [35].Lloret E. et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*. 2015. No.60. C. 40-49.
- [36].Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. T.1. №3. C.301-320.
- [37]. N. Ramachandran, A. Gale. Space colonization. *Aerospace America*. 2008. T. 46, No.12, C. 77.
- [38].Pegna, J. Construction automation: Are we solving the wrong problem? RPI/RDRC Technical Report 92010. 1992
- [39].Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in construction*. 1997. T. 5. No. 5. C. 427-437.
- [40].Khoshnevis B., Dutton R. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*. 1998. T.13. №2. C.53-56.
- [41].Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*. 2004. T. 13. No. 1. C. 5-19.
- [42].Hwang D., Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting. 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea. 2004.
- [43].Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*. 2015. T.15. №1. C. 1-9.
- [44].Gardiner J. Exploring the emerging design territory of construction 3D printing-project led architectural research. 2011. 382c.
- [45].Tay Y. W. et al. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 861. C. 177-181.
- [46].Lim S. et al. Development of a viable concrete printing process. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2011. C. 665-670.
- [47].Buswell R. A. et al. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in construction*. 2007. Vol. 16. No. 2. C. 224-231.
- [48].Buswell R. A. et al. Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*. 2008. Vol. 17. No. 8. C. 923-929.
- [49].Mahapatra S. S., Panda B. N. Benchmarking of rapid prototyping systems using grey relational analysis. *International Journal of Services and Operations Management*. 2013. Vol. 16. No. 4. C. 460-477.
- [50].Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012. T. 21. C. 262-268.
- [51].Le T. T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*. 2012. T. 45. No. 8. C. 1221-1232.
- [52].Laurent, P., Erica, M., Laurent, F. and Safaâ, M. Advanced building materials, *Bus. Innovaion Obs*. 2014. Pp. 2–14.
- [53].Tibaut A., Rebolj D., Perc M. N. Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. T. 27. No. 1. Pp. 251-262.
- [54].Cesaretti G. et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*. 2014. T. 93. C. 430-450.
- [55].Grugel R. N., Toutanji H. Sulfur “concrete” for lunar applications—Sublimation concerns. *Advances in Space Research*. 2008. T. 41. No. 1. C. 103-112.
- [56].Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?. *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. C. 292-299.
- [57]. Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. T. 42. No. 3. C. 558-566.
- [58].Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016. T. 49. No. 4. C. 1213-1220.

- [59]. Shahab A. R. et al. Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials // Proceedings CD of the 1st international conference on rheology and processing of construction materials and of the 7th international conference on self-compacting concrete, Paris, France. 2013.
- [60]. Perrot A. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheologica acta*. 2012. T. 51. No. 8. C. 743-754.
- [61]. Josserand L., Coussy O., de Larrard F. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and concrete research*. 2006. T. 36. No. 9. C. 1603-1608.
- [62]. Roussel N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. *Cement and concrete research*. 2005. T. 35. No. 9. C. 1656-1664.
- [63]. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. – 2006. T. 36. No. 10. C. 1797-1806.
- [64]. Wallevik J. E. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete Research*. 2009. T. 39. No. 1. C. 14-29.
- [65]. Billberg P. Form pressure generated by self-compacting concrete. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland. 2003. C. 271-280.
- [66]. Lowke D, Kraňnk T, Ghelen C, Schiessl P. Effect of cement type and superplasticizer adsorption on static yield stress, thixotropy and segregation resistance. Khayat K, Feys D (eds) *Design, production and placement of self-consolidating concrete*. Springer, Heidelberg. 2010
- [67]. Ferron R. P. et al. Rheological method to evaluate structural buildup in self-consolidating concrete cement pastes. *ACI materials journal*. 2007. T. 104. No. 3. C. 242.
- [68]. Perrot A. et al. Prediction of lateral form pressure exerted by concrete at low casting rates. *Materials and Structures*. 2015. T. 48. No. 7. C. 2315-2322.
- [69]. Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. T. 1. No. 3. C. 301-320.
- [70]. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. 2013. No. 29. C. 50-67.
- [71]. Bederina M., Makhloufi Z., Bouziani T. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia*. 2011. No. 21. C. 28-34.
- [72]. Alhozaimy A. M. Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009. T. 31. No. 7. C. 470-473.
- [73]. Голубева О. А., Потапова Е. Н. Влияние метаксаолина на свойства белого портландцемента // *Успехи в химии и химической технологии*. 2014. Т. 28. №8 (157).
- [74]. Duan P. et al. Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials // *Journal of Materials Research and Technology*. 2013. T. 2. No. 1. C. 52-59.
- [75]. Стеенберг М. и др. Композиционный цемент на основе портландцемента, известняка и прокаленной глины // *Цемент и его применение*. 2012. № 9. С. 44-49.
- [76]. Изотов В. С., Соколова Ю. А. Химические добавки для модификации бетона. Монография. М. : Изд-во «Палеотип», 2006. 244 с.
- [77]. Камалова З. А. и др. Суперпластификаторы в технологии изготовления композиционного бетона // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 8. С. 148-152
- [78]. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012. No. 21. C. 262-268.
- [79]. Abdou M. I., Abuseda H. Upgrading offshore pipelines concrete coated by silica fume additive against aggressive mechanical laying and environmental impact. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016. T. 25. No. 2. C. 193-199
- [80]. Karahan O., Atis C. D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*. 2011. T. 32. No. 2. C. 1044-1049.
- [81]. Malaeb Z. et al. 3D Concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015. T. 6. No. 6.
- [82]. Baehr D. O., Izard D. G. Method for the production of glass fiber-reinforced gypsum sheets and gypsum board formed therefrom : пат. 4265979 США. 1981.
- [83]. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. *Materials and Structures*. 2008. T. 41. No. 4. C. 649-662.

- [84]. Серых И. Р., Панченко Л. А. Прочность стеклофибробетона // Научные труды Sworld. 2014. Т. 9. № 2. С. 43-47.
- [85]. Kim G. B., Pilakoutas K., Waldron P. Development of thin FRP reinforced GFRC permanent formwork systems. Construction and Building Materials. 2008. Т. 22. № 11. С. 2250-2259.
- [86]. M. Yi. 3D (Three-Dimensional) printing high-strength composite board: пат. CN 104328890 A. 2014
- [87]. Ключев А.В., Ключев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2014. № 4. С. 67 – 72
- [88]. Habert G., De Lacaillerie J. B. D. E., Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. Journal of Cleaner Production. 2011. Т. 19. No. 11. С. 1229-1238.
- [89]. Кузьмин С. Н. 3D принтеры. Рабочее поле и виды кинематических схем // Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-25 апреля 2016 г. 2016. С. 94.
- [90]. Mathieus G. J. Rotating nozzle : пат. 5617886 США. 1997.
- [91]. Pearce J. M. et al. 3-D printing of open source appropriate technologies for self-directed sustainable development. Journal of Sustainable Development. 2010. Т. 3. No. 4. С. 17.
- [92]. Малышева В. Л., Красимилова С. С. Возможности 3D принтера в строительстве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-2.
- [93]. Мустафин Н. Ш., Барышников А. А. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2015. № 8 (12)
- [94]. Savytskyi M. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. 3D-printing of build objects. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016. № 3 (216).
- [95]. Шарманов В. В. и др. Трудности поэтапного внедрения BIM // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №10(37). С. 108-120.
- [96]. Барабанщиков Ю. Г., Архарова А. А., Терновский М. В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7 (22). С. 152-165.

## 3D printing in construction

N.I. Vatin <sup>1</sup>, L.I. Chumadova <sup>2</sup>, I.S. Goncharov <sup>3</sup>, V.V. Zykova <sup>4,\*</sup>, A.N. Karpenya <sup>5</sup>, A.A. Kim <sup>6</sup>, E.A. Finashenkov <sup>7</sup>

<sup>1-7</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

---

### ARTICLE INFO

scientific article

doi:

### Article history

Received 28.10.2016

### Keywords

3D printing;  
buildings;  
construction;  
energy efficiency;

---

### ABSTRACT

This article provides an overview of international experience in the application of additive technologies in the construction industry. 3D-printing allows to realize architectural projects of any complexity, abate the amount of industrial waste, to reduce the deficit of housing, cut down material, energy and labor costs for construction. The article shows the basic technologies used for printing of buildings and structures and its distinctive features. Also the question about materials used for the manufacture of building mixtures was examined. Special attention to the assessment of modern State of 3D printing in the world is given. A review of construction companies, equipment manufacturers and research centers, which are major participants in the market is conducted. The main objectives of the study are popularizing additive technologies in Russia, the introduction of innovative construction techniques, and creation of governing document regulating the production activities.

---

#### Contact information:

1. +7(921)9643762, vatin@mail.ru (Nikolai Vatin, PhD, Professor)
2. +7(921)7609300, chumadova.2011@mail.ru (Liudmila Chumadova, PhD, Associate Professor)
3. +7(921)9670522, 9670522@mail.ru (Ivan Goncharov, Postgraduate)
- 4,\* +7(981)8564352, veraverazyk@gmail.com (Vera Zykova, Student)
5. +7(968)1938742, cah4akyc@gmail.com (Alexander Karpenya, Student)
6. +7(967)9740965, Kimtox777@gmail.com (Anton Kim, Student)
7. +7(981)8469808, finashenkov.brazas@gmail.com (Evgeniy Finashenkov, Student)



## References

- [1]. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. 2013. Pp. V009T10A062-V009T10A062.
- [2]. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects. Journal of Construction Engineering and Management. 1998. No.124(1). Pp. 31-41.
- [3]. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. Sustainable Cities and Society. 2016. No.23. Pp. 78-93.
- [4]. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.N. Additivnyye tekhnologii v mashinostroyeni: Uchebn. posobiye. SPb.: SPbGU, 2013. 221 p.
- [5]. Prikaz Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 1 sentyabrya 2015 g. N 1013 "O sozdaniy tekhnicheskogo komiteta po standartizatsii "Additivnyye tekhnologii" [Elektronnyy resurs]. Informatsionno-pravovoy portal Garant.ru. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71074904/> (data obrashcheniya 27.09.2016)
- [6]. Hull C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography : pat. 4575330 SShA. 1986.
- [7]. Chen L. et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Pp.1-10.
- [8]. Valter A. V. Posloynnyy sintez armirovannykh obyemnykh izdeliy. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2011. T.2. No. 12. (rus)
- [9]. Kablov Ye. N. Strategicheskoye napravleniye razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii. 2012. No. 5. Pp.7-17. (rus)
- [10]. Gálvez J. A. Not Just a Pretty Face: Three-Dimensional Printed Custom Airway Management Devices. 3D Printing and Additive Manufacturing. 2016. Vol. 3. No. 3. Pp. 160-165.
- [11]. Barazanchi A. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. Journal of Prosthodontics. 2016.
- [12]. Kumar L. J., Nair C. G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Springer Singapore. 2016. Pp.39-54.
- [13]. Kreiger M. A., MacAllister B. A., Wilhoit J. M., Case M. P. The current state of 3D printing for use in construction. The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. Ames. Iowa. 2015. Pp.149-158.
- [14]. Huang S. H. Liu P., Mokasdar A., Hou, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. T.67. No.5-8. Pp.1191-1203.
- [15]. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering. 2012. T. 2012
- [16]. Küchler S. Additive Technology and Material Cognition: A View from Anthropology. Journal of Cognition and Culture. 2014. T.14. No.5. Pp.385-399.
- [17]. Herderick E. D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future. JOM. 2016. T.68. No. 3. Pp.721-723.
- [18]. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. 2016. T.11. No.3. Pp.209-225
- [19]. L. Xi-Qiang, L. Jing-Fang, Z. Tao, H. Liang, Z. Nan, L. Juan, L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: pat. CN104310918A. 2014
- [20]. Y. Tianrong, L. Qiaoling. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: pat. CN104891891A. 2015
- [21]. F. Peng, M. Xinmiao. Fiber reinforced composite material reinforced 3D (three-dimensional) printing structure: pat. CN104309126A. 2014
- [22]. L. Fu-Cai, W. Yi-Yuan, X. Min, L. Bin, Z. Xin-Zhen, H. Ming. High-performance powder concrete for 3D (three-dimensional) printing: pat. CN104961411A. 2015.
- [23]. Khoshnevis B. Contour crafting extrusion nozzles: pat. US14/961,071. 2015.
- [24]. Dini E. Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor : pat. US8337736. 2012.
- [25]. Dini E., Chiarugi M., Nannini R. Method and device for building automatically conglomerate structures : pat. 11/908,993 SShA. 2006.

- [26]. Campbell T., C. Williams, O. Ivanova. Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC. 2011.
- [27]. Kobryn P. A., Semiatin S. L. The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V. JOM. 2001. T. 53. No. 9. Pp. 40-42.
- [28]. Brennan-Craddock J. et al. The design of impact absorbing structures for additive manufacture. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012. T. 382. No. 1.
- [29]. Klammert U. et al. Cytocompatibility of brushite and monetite cell culture scaffolds made by three-dimensional powder printing. Acta Biomaterialia. 2009. T. 5. No. 2. Pp. 727-734.
- [30]. Lim S. et al. Fabricating construction components using layered manufacturing technology. Global Innovation in Construction Conference. 2009. Pp. 512-520.
- [31]. Horbach S. et al. Building blocks for adaptable factory systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2011. T. 27. No. 4. Pp. 735-740.
- [32]. Müller E. Building Blocks as an Approach for the Planning of Adaptable Production Systems. Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics. Springer Berlin Heidelberg, 2010. Pp. 37-45.
- [33]. Gibson I., Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2010. T.238.
- [34]. Johnston, W. D. Design and Construction of Concrete Formwork. E. G. Nawy (ed.), Concrete Construction Engineering Handbook. CRC Press, 2008. 7-1–7-49.
- [35]. Lloret E. et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. Computer-Aided Design. 2015. No.60. Pp. 40-49.
- [36]. Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. T.1. No.3. Pp.301-320.
- [37]. N. Ramachandran, A. Gale. Space colonization. Aerospace America. 2008. T. 46, No.12, C. 77.
- [38]. Pegna, J. Construction automation: Are we solving the wrong problem. RPI/RDRC Technical Report 92010. 1992
- [39]. Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. Automation in construction. 1997. T. 5. No. 5. Pp. 427-437.
- [40]. Khoshnevis B., Dutton R. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. Materials Technology. 1998. T.13. No.2. Pp.53-56.
- [41]. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. Automation in construction. 2004. T. 13. No. 1. Pp. 5-19.
- [42]. Hwang D., Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting. 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea. 2004.
- [43]. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. International Journal of Construction Management. 2015. T.15. No.1. Pp. 1-9.
- [44]. Gardiner J. Exploring the emerging design territory of construction 3D printing-project led architectural research. 2011. 382c.
- [45]. Tay Y. W. et al. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. Materials Science Forum. – 2016. – T. 861. Pp. 177-181.
- [46]. Lim S. et al. Development of a viable concrete printing process. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2011. Pp. 665-670.
- [47]. Buswell R. A. et al. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. Automation in construction. 2007. T. 16. No. 2. Pp. 224-231.
- [48]. Buswell R. A. et al. Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. Automation in Construction. 2008. T. 17. No. 8. Pp. 923-929.
- [49]. Mahapatra S. S., Panda B. N. Benchmarking of rapid prototyping systems using grey relational analysis. International Journal of Services and Operations Management. 2013. T. 16. No. 4. Pp. 460-477.
- [50]. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in construction. 2012. T. 21. Pp. 262-268.
- [51]. Le T. T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and structures. 2012. T. 45. No. 8. Pp. 1221-1232.
- [52]. Laurent, P., Erica, M., Laurent, F. and Safaâ, M. Advanced building materials, Bus. Innovaion Obs. 2014. Pp. 2–14.

- [53]. Tibaut A., Rebolj D., Perc M. N. Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. T. 27. No. 1. Pp. 251-262.
- [54]. Cesaretti G. et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*. 2014. T. 93. Pp. 430-450.
- [55]. Grugel R. N., Toutanji H. Sulfur "concrete" for lunar applications—Sublimation concerns. *Advances in Space Research*. 2008. T. 41. No. 1. Pp. 103-112.
- [56]. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. Pp. 292-299.
- [57]. Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. T. 42. No. 3. Pp. 558-566.
- [58]. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016. T. 49. No. 4. Pp. 1213-1220.
- [59]. Shahab A. R. et al. Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials. *Proceedings CD of the 1st international conference on rheology and processing of construction materials and of the 7th international conference on self-compacting concrete*, Paris, France. 2013.
- [60]. Perrot A. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheologica acta*. 2012. T. 51. No. 8. Pp. 743-754.
- [61]. Jossierand L., Coussy O., de Larrard F. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and concrete research*. 2006. T. 36. No. 9. Pp. 1603-1608.
- [62]. Roussel N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. *Cement and concrete research*. 2005. T. 35. No. 9. Pp. 1656-1664.
- [63]. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. – 2006. T. 36. No. 10. Pp. 1797-1806.
- [64]. Wallevik J. E. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete Research*. 2009. T. 39. No. 1. Pp. 14-29.
- [65]. Billberg P. Form pressure generated by self-compacting concrete. *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland*. 2003. Pp. 271-280.
- [66]. Lowke D, Krahnkel T, Ghelen C, Schiessl P. Effect of cement type and superplasticizer adsorption on static yield stress, thixotropy and segregation resistance. Khayat K, Feys D (eds) *Design, production and placement of self-consolidating concrete*. Springer, Heidelberg. 2010
- [67]. Ferron R. P. et al. Rheological method to evaluate structural buildup in self-consolidating concrete cement pastes. *ACI materials journal*. 2007. T. 104. No. 3. Pp. 242.
- [68]. Perrot A. et al. Prediction of lateral form pressure exerted by concrete at low casting rates. *Materials and Structures*. 2015. T. 48. No. 7. Pp. 2315-2322.
- [69]. Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. T. 1. No. 3. Pp. 301-320.
- [70]. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. 2013. No. 29. Pp. 50-67.
- [71]. Bederina M., Makhloufi Z., Bouziani T. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia*. 2011. No. 21. Pp. 28-34.
- [72]. Alhozaimy A. M. Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009. T. 31. No. 7. Pp. 470-473.
- [73]. Golubeva O. A., Potapova Ye. N. Vliyaniye metakaolina na svoystva belogo portlandtsementa. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2014. T. 28. No. 8 (157). (rus)
- [74]. Duan P. et al. Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2013. T. 2. No. 1. Pp. 52-59.
- [75]. Steyenberg M. i dr. Kompozitsionnyy tsement na osnove portlandtsementa, izvestnyaka i prokalennoy gliny. *Tsement i yego primeneniye*. 2012. No. 9. Pp. 44-49. (rus)
- [76]. Izotov V. S., Sokolova Yu. A. Khimicheskiye dobavki dlya modifikatsii betona. *Monografiya. M. : Izd-vo «Paleotip», 2006. 244 p.* (rus)
- [77]. Kamalova Z. A. i dr. Superplastifikatory v tekhnologii izgotovleniya kompozitsionnogo betona. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013. T. 16. No. 8. Pp. 148-152. (rus)

- [78]. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in construction. 2012. No. 21. Pp. 262-268.
- [79]. Abdou M. I., Abuseda H. Upgrading offshore pipelines concrete coated by silica fume additive against aggressive mechanical laying and environmental impact. Egyptian Journal of Petroleum. 2016. T. 25. No. 2. C. 193-199
- [80]. Karahan O., Atis C. D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. Materials & Design. 2011. T. 32. No. 2. Pp. 1044-1049.
- [81]. Malaeb Z. et al. 3D Concrete printing: machine and mix design. International Journal of Civil Engineering. 2015. T. 6. No. 6.
- [82]. Baehr D. O., Izzard D. G. Method for the production of glass fiber-reinforced gypsum sheets and gypsum board formed therefrom : pat. 4265979 SShA. 1981.
- [83]. Liu K., Wu Y. F., Jiang X. L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls. Materials and Structures. 2008. T. 41.No. 4.Pp. 649-662.
- [84]. Serykh I. R., Panchenko L. A. Prochnost steklofibrobetona. Nauchnyye trudy Swworld. 2014. T. 9. No. 2. Pp. 43-47. (rus)
- [85]. Kim G. B., Pilakoutas K., Waldron P. Development of thin FRP reinforced GFRC permanent formwork systems. Construction and Building Materials. 2008. T. 22. No. 11. Pp. 2250-2259.
- [86]. M. Yi. 3D (Three-Dimensional) printing high-strength composite board: pat. CN 104328890 A. 2014
- [87]. Klyuyev A.V., Klyuyev S.V., Netrobenko A.V., Durachenko A.V. Melkozernistyy fibrobeton armirovanny polipropilenovym voloknom. Vestnik BGTU im. V.G.Shukhova. 2014. No. 4. Pp. 67 – 72 (rus)
- [88]. Habert G., De Lacaillerie J. B. D. E., Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. Journal of Cleaner Production. 2011. T. 19. No. 11. Pp. 1229-1238.
- [89]. Kuzmin S. N. 3D printery. Rabocheye pole i vidy kinematcheskikh skhem. Krasnoyarsk, Sibirskiy federalnyy universitet, 15-25 aprelya 2016 g. 2016. Pp. 94. (rus)
- [90]. Mathieus G. J. Rotating nozzle : pat. 5617886 SShA. 1997.
- [91]. Pearce J. M. et al. 3-D printing of open source appropriate technologies for self-directed sustainable development. Journal of Sustainable Development. 2010. T. 3. No. 4. Pp. 17.
- [92]. Malysheva V. L., Krasimirova S. S. Vozmozhnosti 3D printera v stroitelstve. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk. 2013. No. 12-2. (rus)
- [93]. Mustafin N. Sh., Baryshnikov A. A. Noveyshiye tekhnologii v stroitelstve. 3D printer. Regionalnoye razvitiye: elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal. 2015. No. 8 (12). (rus)
- [94]. Savytskyi M. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. 3D-printing of build objects. Visnik Pridniprovskoï derzhavnoï akademii budivnitstva ta arkhitekturi. 2016. No. 3 (216). (rus)
- [95]. Sharmanov V. V. i dr. Trudnosti poetapnogo vnedreniya BIM. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. No.10(37). Pp. 108-120. (rus)
- [96]. Barabanshchikov Yu. G., Arkharova A. A., Ternovskiy M. V. Beton s ponizhennoy usadkoy i polzuchestyu. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2014. No. 7(22). Pp. 152-165. (rus)

*Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №1 (52). С. 27-46.*

*Vatin N., Chumadova L., Goncharov I., Zyкова V., Karpenya A., Kim A., Finashenkov E. 3D printing in construction. Construction of Unique Buildings and Structures, 2017, 1 (52), Pp. 27-46. (rus)*