

Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве

Александр Сергеевич Иноземцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнен анализ научных трудов, посвященных разработке и исследованию строительных материалов, изделий и конструкций в технологии 3D-печати. Целью является выявление актуальных тенденций развития, текущих преимуществ и недостатков на основе анализа международного теоретического и практического опыта в изготовлении изделий и конструкций, достигаемых свойств материалов, используемых критериев качества и методов их оценки.

Материалы и методы. Использован комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе и средствах массовой информации, в том числе научных статьях, отчетах и материалах конференций.

Результаты. Ключевые вопросы, которые необходимо решать для развития 3D-печати, связаны с удобоукладываемостью смеси, деформацией и прочностью экструдированного слоя. Существует множество примеров составов чернил преимущественно тяжелого бетона для 3D-принтеров различного устройства. Усредненный состав такого бетона содержит по массе 25–45 % вяжущего вещества, 40–65 % заполнителя — кварцевый песок с размером зерна 2–4 мм и воду в количестве не более 15–35 %, а также минеральные добавки, пластификатор и армирующие волокна. Масштабное внедрение технологии требует разработки методик печати конструкций с учетом анизотропии их свойств в зависимости от направления печати.

Выводы. Показано, что в технологии 3D-печати сложным вопросом в реализации остается армирование конструкций. Для достижения максимальных механических свойств напечатанных конструкций требуется многокритериальная оптимизация, учитывающая реологические требования к смесям, особенности армирования и прочность сцепления слоев. Сложная оптимизация реологии бетонных смесей, особенно наполненных армирующими волокнами, дополняется факторами времени и меняющихся условий окружающей среды, которые на текущем этапе развития технологии игнорируются или принимаются как незначимые. Применение «умных» материалов в технологии послойного возведения строительных конструкций формирует пути для ее совершенствования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-технологии, аддитивные технологии, 3D-печать, аддитивное производство, аддитивное строительство, 3D-принтер, экструзия, строительные чернила, материалы для 3D-печати

Благодарности. Автор выражает благодарность Е.В. Иноземцевой за помощь при подготовке текста статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иноземцев А.С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Иноземцев, InozemcevAS@mgsu.ru.

Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction

Aleksandr S. Inozemtcev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The analysis of scientific works devoted to the development and research of building materials, products and structures in 3D printing technology was carried out in this work. The purpose of the research is to identify actual development trends, current advantages and disadvantages based on an analysis of international theoretical and practical experience in the manufacture of products and structures, achieved properties of materials, used quality criteria and methods for their evaluation.

Materials and methods. The complex of general scientific logical methods of research based on theoretical analysis of technological solutions presented in scientific and technical literature, information resources from developers and media recourses, including patents, scientific articles and scientific reports are used in this paper.

Results. The key issues that need to be addressed for the development of 3D printing are related to mixture workability, deformation and extruded layer strength. There are many examples of ink compositions for 3D printers of various devices

with high performance. The average composition of concrete for 3D printing contains binder, aggregate, water and mineral additives, plasticizer and reinforcing fibres. Large-scale implementation of the technology requires the development of methods for printing structural elements, taking into account the anisotropy of their properties depending on the printing direction. **Conclusions.** The reinforcement of structures remains a complex issue in 3D printing technology. To achieve maximum mechanical properties of printed structures, multicriteria optimization is required, taking into account rheological requirements for mixtures, reinforcement peculiarities and due to the arrangement of metal elements and the adhesion strength of layers. The complex optimization of the rheology of concrete mixtures, especially those filled with reinforcing fibres, is supplemented by the factors of time and changing environmental conditions, which are ignored or accepted as insignificant at the current stage of technology development. The application of “smart” materials forms the way for its improvement.

KEYWORDS: 3D technology, additive technology, 3D printing, additive production, additive construction, 3D printer, extrusion, building ink, 3D printing materials

Acknowledgements. The author is grateful to E.V. Inozemtseva for help in preparing the text of the paper.

FOR CITATION: Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Inozemtcev, InozemtcevAS@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом растет интерес к аддитивным технологиям (АТ) в различных отраслях промышленности. Тема 3D-печати, как способа создания объемных объектов из цифровой модели, широко распространена в научной и популярной литературе. Внимание научного сообщества в России к этому направлению существенно изменилось за последние 10 лет. Число публикаций по ключевым словам «3D-печать» и «3D printing» (рис. 1) в отечественных и международных изданиях¹ с единичных статей в 2012 г. увеличилось до 300 и 1300 в год к 2022 г. [1]. В международных публикациях наблюдается схожая тенденция (рис. 1) [2]. Годовая публикационная активность авторов с ключевым словом «3D printing»

¹ По данным РИНЦ (RSCI — Russian Science Citation Index) и Scopus на 20.09.2022.

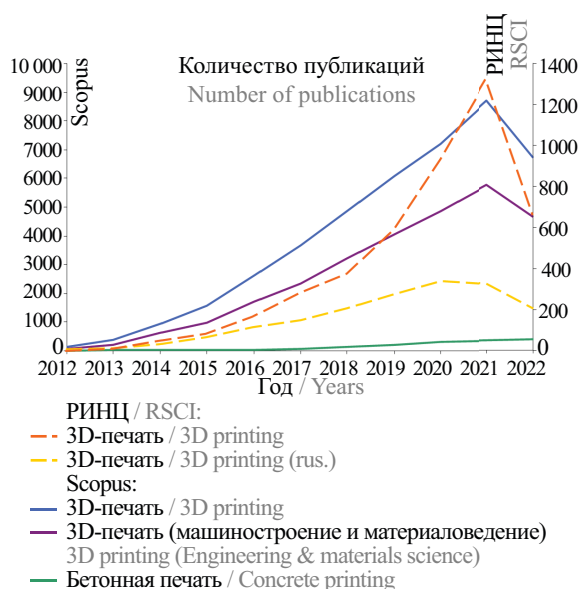


Рис. 1. Количество публикаций, посвященных технологии 3D-печати

Fig. 1. Number of publications dedicated to 3D printing technology

к 2022 г. превысила 6500 материалов. При этом доля статей в области инженерных наук (Engineering sciences) и материаловедения (Materials science) увеличилась с 56 до 69 %. Это свидетельствует о формировании общемирового тренда в исследовательской деятельности в области 3D-печати, как одного из направлений развития цифровых технологий в экономике. Лидерами по научному вкладу в развитие данного тренда являются США и Китай: доля статей составляет 23,1 и 22,1 % (рис. 2) от общемирового публикационного фонда за исследуемый период. Отечественные авторы опубликовали в международных изданиях около 1000 статей (2,4 %) или более 4400 публикаций, индексируемых РИНЦ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель работы — анализ современных технологических решений 3D-печати в строительстве, оценка текущих достижений в теории и практике,

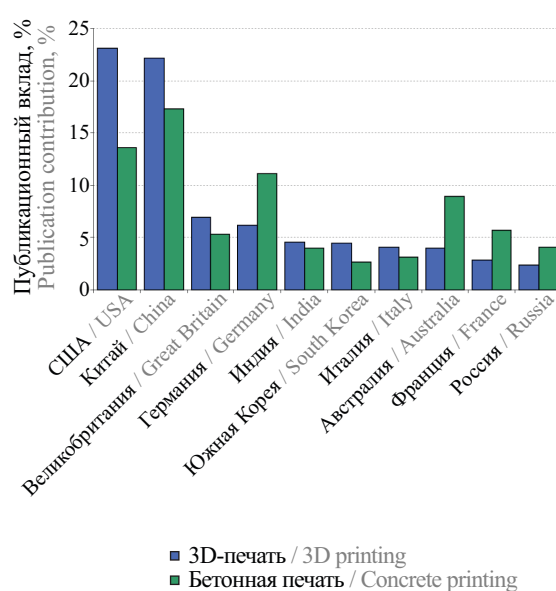


Рис. 2. Публикационный вклад стран по теме 3D-печати

Fig. 2. Publication contributions of countries on the topic of 3D printing

формулировании проблем и тенденций развития. Используется комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, в том числе научных статьях, диссертациях, научных отчетах и материалах конференций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интерес к 3D-печати проявляется и в строительной отрасли. В трудах [3–6] описывается множество преимуществ, которые позволяют реализовать новую технологию: персонализация строительства, сокращение времени строительства, трудозатрат и требований к материалам. Наибольшую распространенность в строительной сфере получают публикации с исследованиями АТ, где в качестве чернил для 3D-печати применяются бетоны [7–10] (рис. 1). Отечественные авторы публикаций в международных изданиях с ключевым словом «concrete printing» входят в ТОП-9 в мировом объеме статей, что составляет 4,1 % (рис. 2). За последние 10 лет и в настоящее время более 30 научно-производственных групп занимаются исследованиями по теме 3D-печати [3].

Растущее внимание к технологии 3D-печати в строительстве связано с потенциальными возможностями, которые могут быть реализованы на строительной площадке, а именно автоматизации строительного процесса за счет механизированного создания объекта из цифровой 3D-модели.

3D-печать из бетона организуется за счет реализации подачи и экструзии смеси через движущееся сопло по соответствующим координатам печатающей головки принтера (экструдера). Карта движения сопла экструдера получается путем разбиения на слои 3D-модели будущего здания.

В работе [5] представлена общая схема системы для 3D-печати с применением бетонных материалов (рис. 3). Технологической особенностью является наличие блока управления, осуществляющего контроль выполнения всех операций с использованием программного обеспечения (ПО). Цифровые продукты для управления системами подачи материалов, перемещения экструдера и контроля качества представляют собой отдельную область для разработки, так как подразумевают не только работу с цифровой моделью будущего строительного объекта, но и постоянное использование меняющихся входных параметров на площадке в момент печати. Это могут быть как внешние факторы (вибрации, положение принтера в пространстве, погодные условия и т.д.), так и внутренние, связанные, например, с изменением свойств строительных чернил во времени. Чернила получают на строительной площадке путем смешивания сухих компонентов в установленных пропорциях с водой и добавками. Удобнее это реализуется с помощью сухих строительных смесей. Приготовление смеси непосредственно перед укладкой обусловлено требованиями к реологии, которую нужно обеспечивать за ограниченный период выполнения операции экструзии.

Целевая задача 3D-печати, как и традиционных технологий строительства, — получение строительного изделия заданной формы и размеров. Послойная

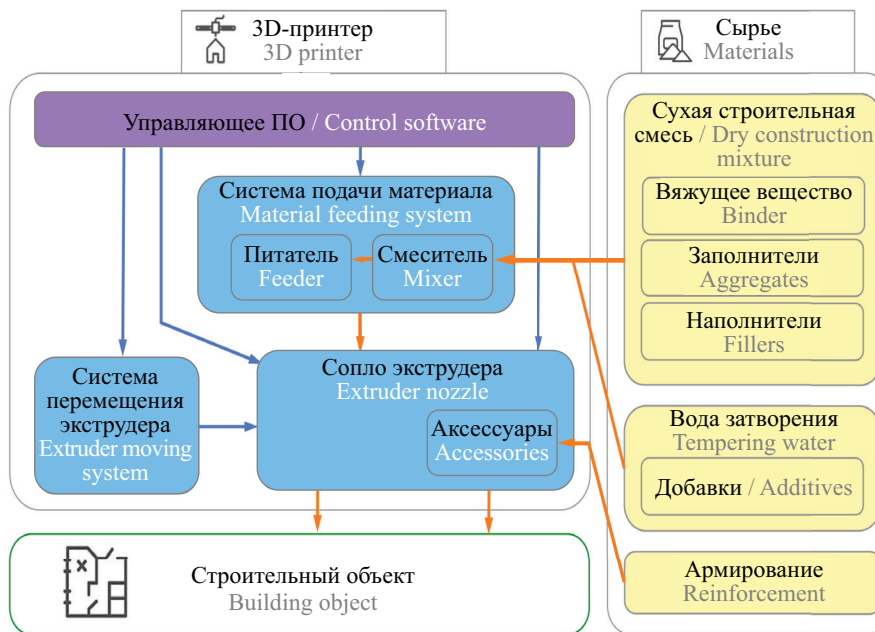


Рис. 3. Общая схема технологии 3D-печати

Fig. 3. General diagram of 3D printing technology

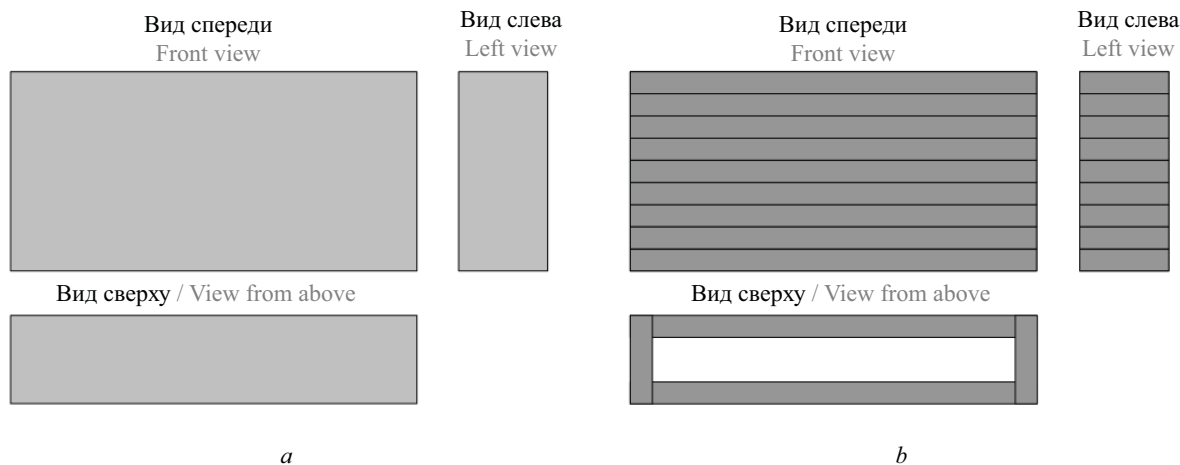


Рис. 4. Общая схема преобразования устройства стеновой монолитной конструкции (а) при использовании технологии 3D-печати (b)

Fig. 4. General scheme for converting a monolithic wall structure (a) using 3D printing technology (b)

экструзия строительных «чернил», как способ изготовления изделий из бетона, приводит к трансформации монолитного объема конструкции (рис. 4, а) в подобие сборного (рис. 4, б). Это ведет к необходимости уделять повышенное внимание границе между слоями для обеспечения качества всей конструкции. При этом увеличение объема экструдированного слоя способствует уменьшению общего количества слоев в изделии одинакового размера. Поэтому определяющим для технологии 3D-печати становятся свойства строительных «чернил».

Большинство исследований послойного создания конструкций использует технологию экструзии небольших (6–50 мм) слоев [3]. При этом «чернила» для 3D-принтеров имеют ограниченную крупность зерен, как правило, составляющую максимальный размер 2–3 мм, подача которых выполняется через сопло круглой, овальной или прямоугольной формы с производительностью 50–500 мм/с.

Реализация процесса печати бетонной смесью обеспечивается за счет подвижного экструдера, перемещение которого выполняется в трех осях (X , Y , Z), не считая дополнительных степеней свободы самого сопла при вращении в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При этом в зависимости от конструкции принтера возможности перемещения в пространстве могут быть расширены, например, при использовании роботов-манипуляторов. Согласно публикациям [3, 5] разработки оборудования для печати (3D-принтеров) в настоящее время основываются на реализации следующих конструктивных схем (рис. 5):

- роботы-манипуляторы (примеры [3–23]) (рис. 5, а);
- порталные и рамные системы (примеры [3, 5, 24–32]) (рис. 5, б);
- крановые системы (примеры [3, 5, 33–40]) (рис. 5, в).

Системы робот-манипулятор в настоящее время популярны из-за большого числа степеней свободы и трансформированной из машиностроения инфраструктуры для эксплуатации, адаптированной под строительные нужды. Достоинством такой системы является гибкость настройки и высокая точность движения, недостатками — большая стоимость и сложная система управления. Портальные и рамные системы перемещения печатающей головки легко адаптируются под различные режимы печати в зависимости от вида «чернил». Такие принтеры обладают относительно простой конструкцией, что способствует доступности обслуживания и ремонта, а также легко настраиваемой площадью печати, которая ограничивается размерами несущего портала или рамы. Крановые системы менее распространены, но примеры успешного их использования на практике также существуют. Точность позиционирования печатающей головки в горизонтальной плоскости при максимальном вылете стрелы такого принтера снижается. Несмотря на быстроту сборки и подготовки к началу работы, эти принтеры требуют больше затрат на техническое обслуживание, чем порталные или рамные. Дополнительно выделяют тросовую систему печати, которая основывается на управлении длиной тросов для перемещения сопла экструдера в пространстве. Недостатки такого принтера заключаются в низкой точности и стабильности перемещения по координатам.

Каждая из конструкций устройства принтера имеет преимущества и недостатки. Портальные и крановые принтеры способны обеспечить лучшую масштабируемость процесса печати и производительность изготовления изделий, робот-манипулятор за счет большей степени свободы приспособлен к более сложным задачам при относительно быстрой реализации.

Особенности устройства принтера формируют важную группу технологических факторов (скорость

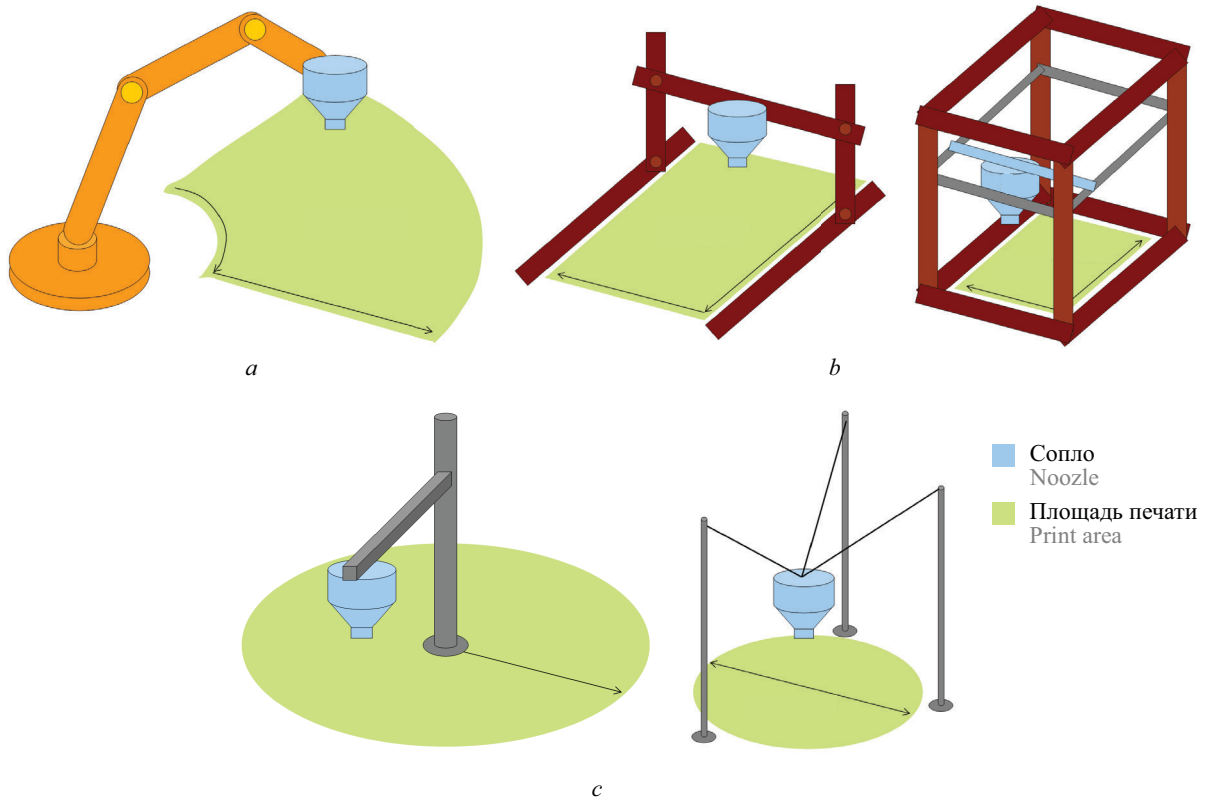


Рис. 5. Конструкционные схемы устройства строительных 3D-принтеров: *a* — роботы-манипуляторы; *b* — порталная/рамная; *c* — крановая

Fig. 5. Structural diagrams of construction 3D printers: *a* — robotic manipulators; *b* — portal/frame; *c* — crane

подачи смеси, размер и форма сопла экструдера, расстояние подачи смеси, давление в системе и др.), влияющих как на качество изготавливаемого изделия и эффективность печати в целом, так и на требования к смесям, которые будут применяться в качестве «чернил». Например, производительность печати, очевидно, зависит от скорости движения сопла экструдера, что в свою очередь должно соотноситься со временем структурирования бетонной смеси и набора прочности, достаточной для восприятия следующего слоя. Варьирование скорости экструзии связано с видом печатаемого изделия и может изменяться в широких диапазонах: от 1–6 м/ч [28] для вертикальных конструкций (столбов) до 15–200 мм/с [30, 41] при изготовлении горизонтальных конструкций (бордюры, плиты и т.д.). При этом интервал нанесения двух слоев составляет 11–60 с. Это формирует рецептурные задачи сочетания как высокой сохраняемости подвижности смеси для выработки большего объема материала, так и достаточной прочности для восприятия верхних слоев без существенной потери формы.

Важнейшую роль для обеспечения качества печатаемой конструкции выполняет сопло экструдера, так как определяет форму и размеры экструдированного слоя. Форма сопла у производителей оборудования может быть реализована в виде эллиптического или прямоугольного сечения, где частными вариантами являются круглые или квадратные. Геометрия сопла оказывает влияние и на скорость его движения.

Так, движение прямоугольного сопла (40×10 мм) ограничивалось скоростью 30–35 мм/с [3], а круглого (с диаметром 9 мм) — 50–66 мм/с. Назначение будущих изделий или конструкций, печатаемых на 3D-принтере, определяет выбор формы сопла [30–45]. Очевидно, что при изготовлении конструктивных элементов зданий стоит стремиться к сечению с ровными поверхностями и прямыми углами [5], чтобы минимизировать последующую отделку. В случаях, когда слоистость изделий выполняет дополнительно декоративную функцию, применимы варианты с обтекаемой формой сопла. При этом угол экструдирования так же стоит учитывать. Круглые и эллиптические сопла независимо от угла подачи смеси неспособны обеспечить ровность вертикальных поверхностей изделия вследствие так называемого *sausage effect*² [3], что требует использования выравнивающих направляющих. Это фактически преобразует форму такого сечения сопла в квадратную или прямоугольную. В таком случае изменение угла подачи бетонных «чернил» с 90° до 0° к поверхности печати будет способствовать достижению лучшей сохраняемости формы слоя при равных свойствах материала.

Описаны поршневой и шнековый способы экструзии материала через сопло [5]. В первом слу-

² Деформация слоя в вертикальном направлении, придающая ему обтекаемую форму.

чае строительные «чернила» подаются напрямую за счет выдавливания металлическим толкателем (поршнем) из цилиндра. Во втором — проталкивание материала обеспечивается вращающимся винтом в цилиндре (или роторно-статорное устройство). Такая система подачи дополнительно может быть интегрирована насосом для давления бетонной смеси сжатым воздухом.

Послойное возведение конструкций является непрерывным технологическим процессом, необходима постоянная подача печатаемого материала в большом количестве, что с учетом ограниченной вместимости печатающей головки требует удаленного накопителя. Существует четыре типа систем подачи материала [36, 46–54] к соплу экструдера, которые можно разделить на 2 части: системы с удаленным и местным питателем.

В первом типе система оснащена насосом, который из удаленного от места экструзии накопителя с помощью трубопровода подает бетонную смесь (рис. 6, *a*). Во втором (рис. 6, *b*) — дополнительно оснащается местным питателем для накопления рабочего объема смеси, обеспечивающего непрерывную его подачу через сопло. Отдельно стоит выделить поршневую систему (рис. 6, *c*), где питатель служит частью экструзионного сопла, в котором давление создается подвижным плунжером. Четвертый тип системы характеризуется наличием локального питателя, расположенного в зоне экструзии (рис. 6, *d*).

Выбор системы подачи обосновывается сложностью печатаемой конструкции и составом смеси. Так, локального питателя экструзионной головки может быть достаточно для небольших объемов производства, например при изготовлении архитектурных

форм. Кроме того, в питателе может дополнительно содержаться шнек или вращающиеся лопадки, позволяющие поддерживать однородность смеси и сохранять требуемую текучесть. При этом такой локальный питатель может выполнять функцию смесителя, где в основную смесь вводятся добавки, например ускоритель твердения или фибра [55].

Однако для реализации полномасштабного объемного возведения конструкций по технологии 3D-печати наличие локального питателя не является управляющим фактором. Определяющими для производительности экструдирования будут характеристики удаленного питателя. Но локальный питатель помогает компенсировать технологические задержки времени реакции (корректировки) системы подачи на изменение внешних условий. То есть изменение давления в трубопроводе от удаленного питателя к головке отразится на качестве печати с временным интервалом, что при отсутствии локального питателя затрудняет контроль и управление процессом экструзии.

Транспортировка бетонной смеси требует использования насосного оборудования с относительно высоким давлением 10–40 бар [56], которое зависит от вязкости «чернил». Поэтому на этапе подачи бетонной смеси необходимо обеспечивать стойкость смеси к расслоению при таком давлении. При этом управление стойкостью осуществляется крупностью заполнителя, В/Ц отношением или наличием добавок. Таким образом, качество печати складывается из баланса между технологическими и рецептурными факторами, обеспечивающими процесс послойного возведения конструкции из бетонной смеси.

Технология 3D-печати из-за особенностей формирования строительных конструкций требует ис-

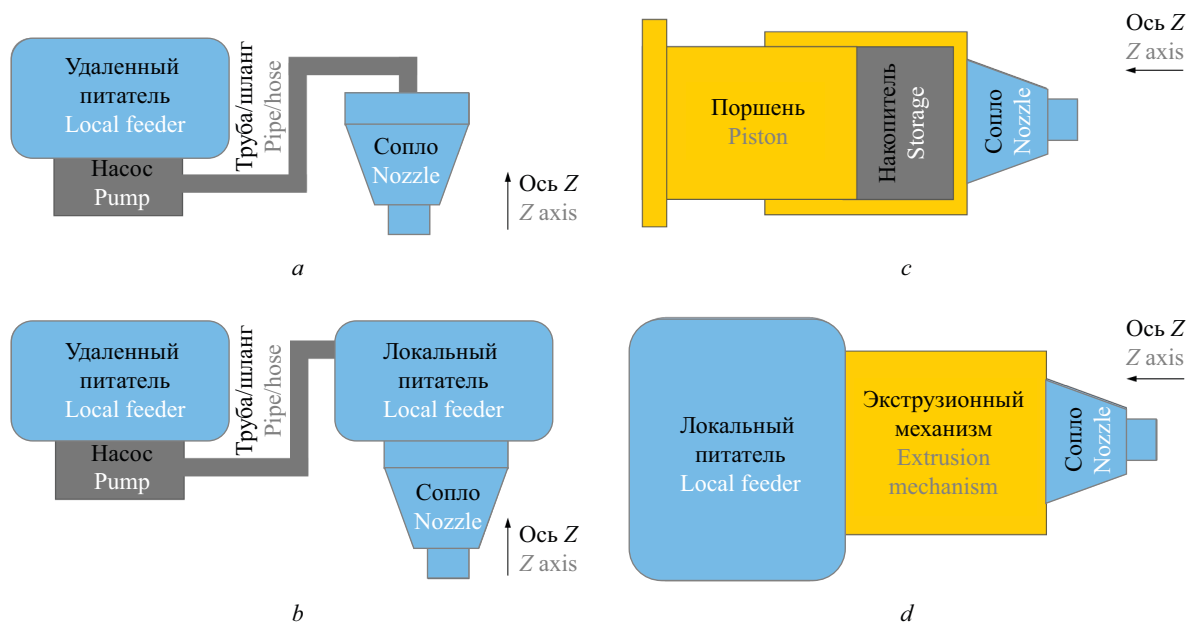


Рис. 6. Возможные схемы устройства системы подачи и экструзии в 3D-принтерах [5]

Fig. 6. Possible options for the design of the feeding and extrusion system in 3D printers [5]

пользования в качестве чернил материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Кроме того, отсутствие опалубки, как при сборном или монолитном строительстве, не позволяет использовать традиционный бетон. В связи с этим низкая или нулевая осадка конуса выглядит ключевым требованием к подвижности бетонной смеси. Однако закономернее обозначить тиксотропность реологического поведения дисперсной системы для аддитивного строительного производства. При этом управление реологией таких смесей обеспечивается рецептурными решениями, например варьированием крупностью дисперсной фазы, расходом воды или применением специальных добавок.

Ключевым наполнителем в технологии 3D-печати является песок [57]. Использование песчаной фракции (до 5 мм) природных каменных материалов, в основном кварцевых и известняковых, обусловлено необходимостью наполнения объема плотной и прочной фазой, уменьшающей пустотность, усадку и ползучесть, а следовательно, повышающей прочность всего композита. Комбинирование различных фракций песка позволяет оптимизировать состав бетонных смесей для достижения максимальной плотности. Микрокремнезем как пуццолановая добавка получил широкое распространение как компонент для бетона, поэтому его использование в цементных составах для 3D-печати не менее обосновано. Представляя собой тонкодисперсные частицы SiO₂ (менее 1 мкм) сферической формы, такая добавка обладает низкой насыпной плотностью 130–600 кг/м³ и высокой истинной плотностью 2200–2300 кг/м³, а площадь удельной поверхности

достигает 15–30 тыс. м². Зола уноса представляет собой пылевидную фракцию (0,5–300 мкм) сферических частиц в основном из SiO₂, Al₂O₃ и CaO. Использование суперпластификаторов в бетонных смесях для 3D-печати обусловлено не только необходимостью снижения В/Ц отношения для повышения прочности бетона, но, прежде всего, возможностью управления вязкостью системы [5]. Для повышения механических свойств затвердевшего бетона применяются армирующие волокна. Это могут быть полипропиленовая, стеклянная или металлическая фибра.

По данным исследования [58], в сравнении с традиционными и самоуплотняющимися бетонами состав бетонных смесей для 3D-печати можно охарактеризовать большим содержанием мелкого заполнителя (более 40–45 % по массе) (табл. 1). При этом особенности устройства оборудования для подачи и экструзии полностью исключают крупный заполнитель, кроме единичных попыток [48], где применялся заполнитель размером зерен до 10 мм. Вследствие этого доля вяжущего вещества может достигать 25–30 %. Высокое В/Ц отношение требует применения пластификаторов, что позволяет достичь значений 0,30–0,40. Опыт получения смесей для 3D-печати показывает, что для их приготовления могут использоваться различные вяжущие вещества и мелкие заполнители, варьируемое отношение В/Ц и П/Ц, различный расход добавок, в том числе волокна, наноматериалы или глины. Большинство не содержит крупного заполнителя для предотвращения блокировки подачи смеси на этапах перекачки и экструзии. Управ-

Табл. 1. Примеры некоторых составов для 3D-печати

Table 1. Examples of some compositions for 3D printing

Содержание компонентов, мас. % Component content, wt. %			В/Ц W/C	Источник Reference
Вяжущее вещество Binder	Минеральные добавки Mineral additives	Заполнитель Aggregate		
30,6	30,5 (2 вида) / (2 types)	–	0,41	[28]
24,0	21,1	45,3	0,13	
21,3	7,5 (2 вида) / (2 types)	43,0	0,35	[29]
13,9	15,4 (2 вида) / (2 types)	46,8	0,42	[30]
21,0	37,9	15,7	0,39	[43]
18,7	10,8 (2 вида) / (2 types)	46,8	0,40	[44]
25,0	10,5 (2 вида) / (2 types)	54,5	0,13	
25,0	10,0	53,0	0,16	[62]
15,0	11,0 (2 вида) / (2 types)	65,5	0,18	[63]
16,0	18,0 (2 вида) / (2 types)	57,0	0,18	[64]
14,0	18,5 (2 вида) / (2 types)	54,5	0,30	[65]
40,0	40,0	–	0,30	[66]
42,0	–	43,0	0,12	[67]
26,0	11,0 (2 вида) / (2 types)	51,0	0,15	[68]
25,0	3,0	60,0	0,16	[69]

ление реологией осуществляется за счет введения функциональных добавок: модификаторов вязкости, пластификаторов, ускорителей твердения или наноматериалов [59–61].

В табл. 1 представлены некоторые примеры вариаций соотношения компонентов для приготовления бетонов для 3D-печати. При этом они могут быть в виде базовых соотношений, где массовым содержанием добавок и модификаторов можно пренебречь. Видно, что массовая доля заполнителя в смесях для 3D-печати в большинстве исследований находится в диапазоне 45–55 %. Это свидетельствует о высокой доле цементно-минеральной составляющей, которая достигает около половины состава всей смеси, что существенно больше в сравнении с традиционным тяжелым бетоном, где доля заполнителя обычно более 75 % [70]. Усредненное соотношение компонентов по массе для получения строительных чернил для 3D-печати можно представить в следующем виде:

- вяжущее вещество — $36 \pm 10 \%$;
- вода — $11 \pm 5 \%$;
- заполнитель — $53 \pm 13 \%$.

Также в состав вяжущего вещества для экономии портландцемента входят минеральные добавки — микрокремнезем, зола уноса или их комбинация в количестве около 20 и 10 % соответственно [71]. Функция первого из них заключается в улучшении тиксотропии и повышении пригодности к печати, золы уноса — в улучшении прокачиваемости и экструдированности бетонной смеси. Среднее В/В отношение составляет 0,3. Отметим, что большинство составов имеет высокую плотность — до 2300 кг/м^3 , как у традиционных тяжелых бетонов, так как в качестве заполнителя используются плотные пески. Однако существует опыт получения составов легкого бетона для 3D-печати, наполненных полими микросферами [72–75]. Авторами предложены составы мелкозернистого бетона со средней плотностью $1400 \pm 100 \text{ кг/м}^3$. При этом для обеспечения внутреннего ухода за гидратацией портландцемента в составе таких бетонов используются растворы суперабсорбирующих полимеров, что позволяет управлять процессом их полимеризации, гелеобразования и, как следствие, удерживающей способностью воды.

Для описания течения бетонных смесей для 3D-печати, согласно работе [57], зачастую применяется модель Бингама [76–83]:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma},$$

описывающая зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ с учетом предела текучести τ_0 и пластической вязкости μ . При этом для бетонных «чернил» для 3D-принтеров необходимо учитывать величину напряжения сдвига, способствующую как начальному течению смеси из состояния покоя, так и поддержанию ее течения, или статического и динамического предела текучести соответственно.

Кроме того, как любая дисперсная система на цементной основе, бетонные смеси для экструдирования обладают тиксотропией и структурированием, которые вследствие флокуляционного взаимодействия частиц и гидратационных процессов вяжущего способствуют изменению их реологических свойств. Так, ключевыми факторами для управления способностью к прокачиванию (pumpability) и экструдированию (extrudability) являются динамический предел текучести и пластическая вязкость, а для сохранения формы напечатанного слоя и пригодности к печати (buildability) — статический предел текучести, тиксотропия и скорость структурирования.

Кроме того, для строительных «чернил» для 3D-принтеров применимо свойство «открытое время» (open time) или время печати, которое обычно определяется с помощью прибора Вика как период времени от начала (иногда от завершения приготовления смеси) до конца схватывания [3]. Определение напряжения сдвига или вязкости осуществляется с помощью вискозиметра или косвенно через осадку конуса [27], прочность свежего бетонного слоя может устанавливаться на отформованных цилиндрах по величине деформации и времени до разрушения от воздействия плиты известной массы [28].

Разработка бетонной смеси для 3D-печати представляет собой итерационный процесс (рис. 7 [58]). Каждые рецептурные изменения приводят к последовательной оптимизации бетонной смеси по способности ее к прокачиванию, экструдированию, формованию, времени и пригодности к печати путем оценки соответствия требованиям. В случае несоответствия состава одному из требований смесь корректируется и подвергается оценке соответствия по указанным показателям качества [69].

Таким образом, к бетонным смесям для аддитивного строительного производства предъявляются полярные реологические требования. С одной стороны такие системы должны обладать высокой удобоукладываемостью, чтобы обеспечить подачу материала к месту экструзии, с другой — высокой вязкостью и тиксотропией сразу после формования через сопло экструдера [67–100].

В труде [58] представлены обобщающие сведения о рабочих диапазонах статического и динамического предела текучести смесей для строительной 3D-печати. Так, границы статического предела текучести описаны в диапазоне 0,16–6,8 кПа, где высокая степень наполнения тонкими компонентами (например, наноглины или зола уноса) обеспечивает получение более вязких чернил. При этом динамический предел текучести варьируется от 0,05 до 0,76 кПа, а пластическая вязкость — от 1,6 до 5,8 Па·с. Однако автором отмечается отсутствие единого подхода при разработке бетонных смесей для 3D-печати и общих абсолютных значений указанных реологических показателей, которые были пригодны к применению. Это связано как с отсут-

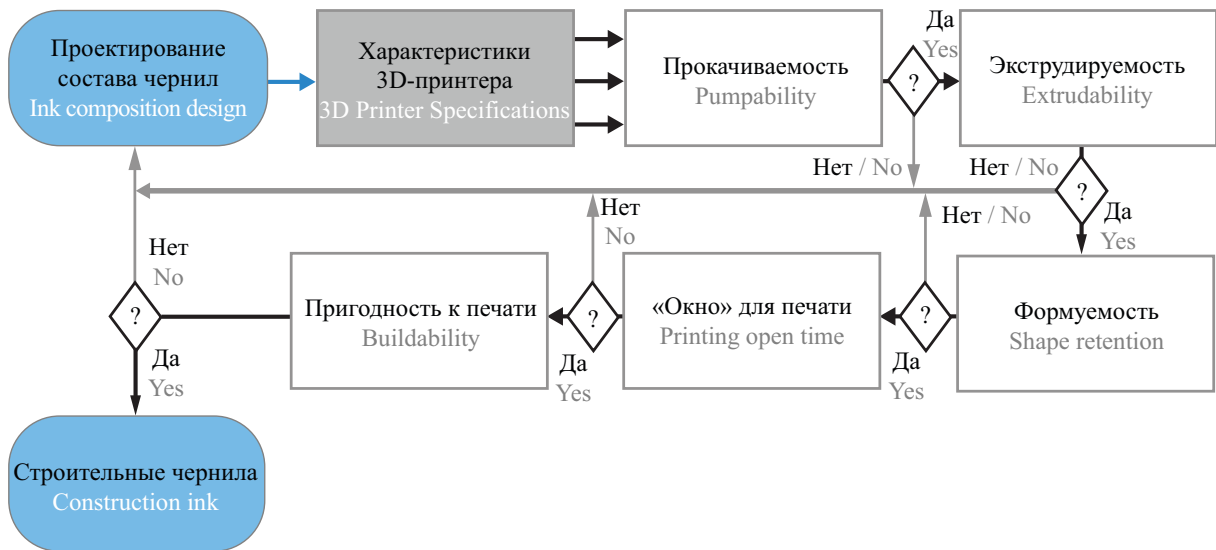


Рис. 7. Итерационный процесс проектирования состава бетонной смеси для 3D-печати [58]

Fig. 7. Iterative process of designing the composition of a concrete mixture for 3D printing [58]

ствием работ, где исследовались одновременно все три характеристики, так и с варьируемой методикой их измерения, в том числе из-за измерительных систем (реометров). Таким образом, разработанные бетонные смеси не обладают универсальностью применения. То есть строительные «чернила», применимые для одного 3D-принтера, являются не совместимыми для экструзионного оборудования другого производителя.

Важно также отметить, что большинство работ [52, 98, 101–103] посвящено исследованиям без учета множества особенностей печатающего оборудования, таких как форма и размер сопла экструдера, расстояние и давление в системе подачи смеси и др. Такие технологические факторы должны учитываться в зависимости от кинетических преобразований бетонных смесей на цементном вяжущем, вызванных процессами гидратации. В работах [98, 104, 105] интенсивность структурообразования ограничивается широким диапазоном приращения прочности 12–27 Па/мин при В/Ц = 0,2–0,4, а в некоторых случаях [106] средней величиной — 43 Па/мин.

Прокачиваемость³, как свойство бетонной смеси, связана с обеспечением требуемой реологии при сохранении первоначальных свойств [107]. При этом в системе трубопроводов требуется относительно подвижная смесь, а в зоне экструзии (у сопла) — жесткая для сохранения формы. Для обеспечения такого сочетания свойств выделяют [108] 2 подхода:

- увеличение доли цементно-минерального теста, обеспечивающего равномерность распределения по поверхности частиц заполнителя;

³ Прокачиваемость (от англ. pumpability) определяется как способность смеси транспортироваться под давлением по системе трубопроводов.

- управление вязкостью цементно-минерального теста для контроля однородности и предотвращения расслоения.

Для измерения прокачиваемости строительных «чернил» используют реометр, а также контролируют консистенцию с помощью прибора Вика [109]. В публикации [110] показано, что смеси с пределом текучести и пластической вязкостью $0,59 \pm 0,08$ кПа $38,7 \pm 4,5$ Па·с имели удовлетворительную прокачиваемость и экструзируемость.

Как показано выше, структурирующиеся бетонные смеси изменяют вязкость во времени вследствие гидратации портландцемента, что сказывается на их прокачиваемости [3]. При подаче такой смеси к соплу экструдера будет возникать повышенное давление. Подбор оборудования для прокачивания бетонной смеси связан с ее рецептурой. Так, давление в системе может быть снижено за счет уменьшения отношения количества заполнителя к вяжущему веществу в составе чернил [111, 112]. Бетонная смесь представляет собой дисперсную систему с заполнителем в качестве дисперсной фазы и цементно-минеральной матрицей — дисперсной среды. То есть обеспечение требуемой прокачиваемости достигается оптимизацией каждой из составляющей такой системы. Например, добавление известняковой муки, согласно исследованию [113], позволит ускорить прокачивание смеси или снизить давление в трубопроводе. С этой же целью можно использовать способность бетонной смеси на портландцементе разжижаться при внешнем воздействии за счет интеграции системы подачи «чернил» с вибрационными механизмами.

Традиционно при изготовлении железобетонных изделий в сборной или монолитной технологии формование осуществляется из подвижных смесей

или с применением принудительного разжижения (вибрирования). В технологии 3D-печати наряду с необходимостью обеспечить поставку бетонной смеси через систему трубопроводов требуется сохранить форму изделия после его подачи из сопла экструдера. Экструдированность⁴ достигается за счет тиксотропности бетонной смеси, так как после снятия внешнего воздействия на смеси в момент формования (экструдирования) «чернила» восстанавливают высокую вязкость. При этом важно с учетом типа принтера, размера сопла экструдера и других технологических особенностей конкретного принтера осуществлять подбор компонентов и их соотношения для предотвращения расслоения и блокировки течения в трубопроводе и печатающей головке.

Согласно работе [107] экструдированность бетонных смесей нарушается при превышении предела текучести 0,9 кПа вследствие протекания гидратационных процессов. Увеличение доли песка в составе «чернил», как и увеличение размера зерен заполнителя, приводит к ухудшению экструдированности [107, 100]. Однако жесткие смеси, которые хорошо сохраняют форму после экструзии, склонны к разрывам слоя, нарушению сплошности и образованию пустот, что отражается на прочности при изгибе затвердевшего бетона. Улучшение экструдированности возможно за счет использования более подвижных бетонных смесей, структурирование которых интенсифицируется за счет применения ускорителей непосредственно перед подачей, т.е. у сопла печатающей головки.

Таким образом, к ключевым рецептурным факторам, влияющим на экструдированность, можно отнести В/Ц отношение, соотношение количества заполнителя к вяжущему веществу, свойства заполнителя, расход функциональных добавок, которые позволяют управлять реологией; к технологическим факторам — характеристики печатающего оборудования, 3D-принтера: давление подачи, длина и диаметр трубы в этой системе, размер и форма отверстия сопла экструдера.

Пригодность к печати⁵ — важный показатель для бетонных смесей, так как деформация слоя может привести к разрушению конструкции или изделия после последовательного нанесения нескольких слоев. В отличие от опалубочного формования в технологии 3D-печати бетонная смесь должна выполнять самонесущую функцию. Технологическими способами повышения пригодности к печати яв-

ляются использование экструдера с прямоугольной формой сопла, что позволяет увеличить площадь контакта слоев и распределить нагрузку, или увеличение количества смежных слоев, обеспечивающих боковую поддержку в плоскости формования [24].

Обеспечение процесса 3D-печати бетоном требует более тщательного контроля за реологией смеси, учитывающего взаимосвязь несколько параметров. Известны попытки исследовать влияние различных компонентов смеси для 3D-печати на статический предел текучести. Так, в публикации [77] авторами использовалось математическое уравнение, демонстрирующее взаимосвязь статического предела текучести и крупности частиц дисперсной фазы, а в трудах [78, 79] были предприняты попытки связать предел текучести цементного теста с пределом текучести строительного раствора. В работе [76], используя теорию Фуллера – Томпсона и модель Марсона – Перси, показано влияние гранулометрии кварцевого песка на улучшение пригодности к печати (buildability). Авторами [80] показано, что предел текучести в составах бетонных смесей для 3D-печати может существенно варьироваться в широком диапазоне, и предложено уравнение:

$$\frac{\tau_f}{\tau_i} = \frac{H}{h}, \quad 25 \leq \frac{\tau_f}{\tau_i} \leq 150,$$

где τ_f и τ_i — конечный и начальный предел текучести в нижнем слое соответственно; h — высота печатаемого слоя.

Таким образом, реология бетонных смесей является ключевой для реализации технологии 3D-печати. Особенно важно прогнозирование изменения этих свойств во времени. В исследовании [28] предложена модель для предела текучести:

$$\tau_0(t) = A_{thix} t_c (e^{t/t_c} - 1) + \tau_{0,0}$$

и критического периода деформативности, как периода ожидания между экструзией соседних слоев, необходимого для предотвращения разрушения:

$$t_f = \frac{\tau_{0,0}}{\rho g R / \alpha_{geom} - A_{thix}},$$

где

$$\alpha_{geom} = 2 \left(1 + \frac{D}{2\sqrt{3}h} \right),$$

где A_{thix} — постоянная скорость увеличения предела текучести во времени; t_c — характеристика времени (корректировочная величина); t_r — время покоя слоя (т.е. $t_r = 0$); $\tau_{0,0}$ — предел текучести первого экструдированного слоя; ρ — средняя плотность бетона; g — ускорение свободного падения; R — постоянная, зависящая от скорости экструзии в диапазоне 1,1–6,2 м/ч; α_{geom} — геометрический фактор, зависящий от формы строительной конструкции; D — диаметр конструкции; h — высота конструкции на уровне первого слоя [28].

⁴ Экструдированность (от англ. extrudability) определяется как способность смеси формироваться в слое под давлением при сохранении геометрии и формы.

⁵ Пригодность к печати (от англ. buildability) определяется как способность смеси в напечатанном слое сопротивляться деформациям и разрушению как под действием собственного веса, так и последующими при печати слоями.

Предел текучести τ_c можно оценить по распы-
ву бетонной смеси из цилиндра:

$$\tau_c = \frac{\rho g (h_0 + h_R)}{\sqrt{3}},$$

где h_0 — начальная высота цилиндра радиусом R_0 (вискозиметра); h_R — высота бетонной смеси после истечения из цилиндра (вискозиметра) до радиуса R .

Для оценки деформативности используется ко-
нус с диаметром $d_0 = 100$ мм, который рассчиты-
вается по формуле [93]:

$$\Gamma = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2},$$

где d_1 — максимальный диаметр расплыва; d_2 —
диаметр, перпендикулярный d_1 .

Альтернативной мерой деформативности явля-
ется пластическая вязкость бетонной смеси, изме-
нение которой во времени можно выразить следую-
щим образом [91]:

$$\mu_m(t) = \mu_m(0, T) + \Delta\mu_{eq} \left(\frac{t}{t_f} \right),$$

где $\mu_m(0, T)$ — начальная пластическая вязкость
при температуре T ; $\Delta\mu_{eq}$ — приращение по линейной
регрессии; t_f — время завершения укладки бетон-
ной смеси. При этом необходимо учитывать фактор
температуры бетонной смеси и времени окончания
ее укладки.

В настоящее время распространенной практи-
кой является экструзия слоя с постоянной высотой.

Однако в процессе печати слой стремится деформи-
роваться как под собственным весом, так и под весом
каждого последующего слоя сверху. Это приводит
к увеличению расстояния между соплом экструдера
и поверхностью формования [3], что в результате
нарушает технологию укладки слоя, которая выра-
жается в кручении и нарушении сплошности слоя,
а также ухудшении адгезии между ними. Подобный
эффект накапливается с увеличением общей высо-
ты напечатанной конструкции и может приводить
к разрушению. Поэтому актуален вопрос ускорения
набора прочности слоев, обеспечивающей скорость
возведения объекта по высоте.

Механические свойства экструдированных ма-
териалов в большей степени вызывают интерес
в конструкции. Прочность конструкции опре-
деляет эффективность строительных «чернил»
при послойном устройстве. Вследствие послойно-
го нанесения материала для конструкций, напеча-
танных на 3D-принтере, характерна анизотропия
свойств [57]. При оценке прочностных характери-
стик такого материала в конструкции следует учи-
тывать направление приложения нагрузки относи-
тельно плоскости формования (рис. 8).

Стандартной анизотропией напечатанного бе-
тона при определении прочности на сжатие счита-
ется 18–35 % [57]. При этом средняя прочность со-
ставляет 75–105 МПа.

Как известно [92], В/Ц отношение является
важнейшим фактором для достижения требуемой
прочности бетона как для обеспечения достаточной

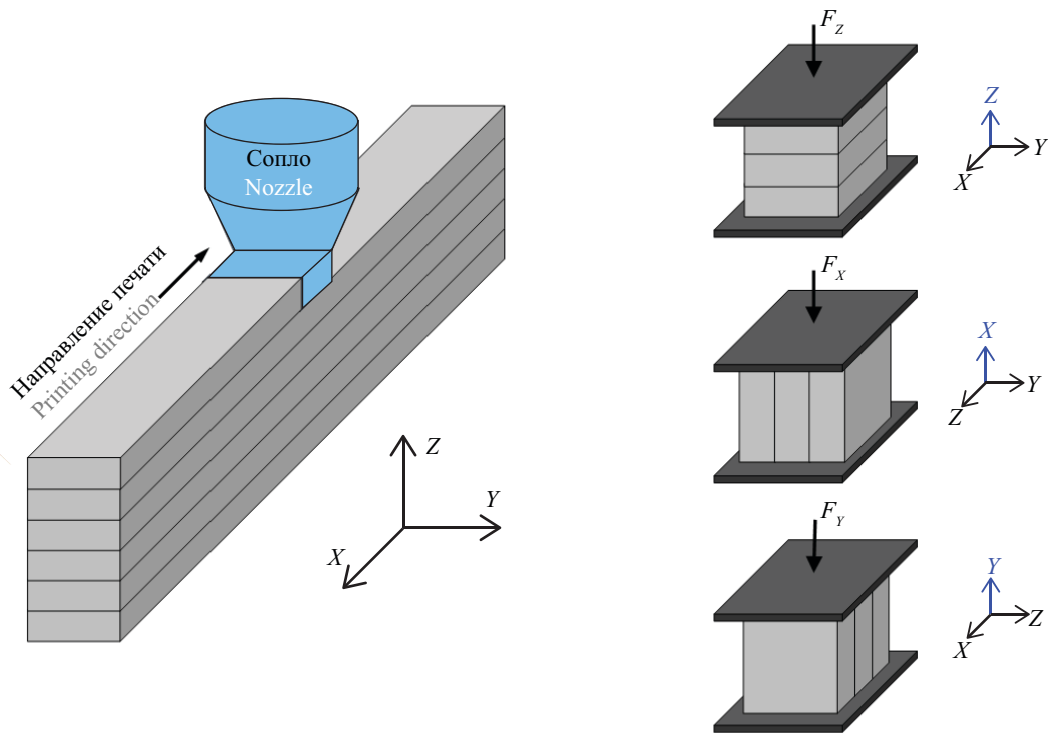


Рис. 8. Направление приложения нагрузки при испытании образцов бетона на прочность, отобранных из напечатанных конструкций

Fig. 8. Direction of load application during strength testing of concrete specimens selected from printed structures

гидратации вяжущего, так и для ограничения вовлечения воздуха. В технологии 3D-печати подача бетонной смеси под давлением приводит к снижению количества вовлеченного воздуха, что выражается в увеличении прочности относительно образцов, изготовленных формованием [94]. Кроме того, положительный эффект наблюдается для строительных чернил с фиброй, в которых под давлением происходит ориентирование волокон преимущественно вдоль направления экструзии. Это приводит к увеличению прочности при изгибе в соответствующих направлениях испытания.

Из множества исследований [68–95, 114–116] анизотропии свойств в конструкциях, напечатанных из бетона, следует, что направление печати и ее продолжительность оказывают значительное влияние на общую несущую способность, что необходимо учитывать при проектировании объектов. Средняя величина прочности при изгибе составляет 10–15 % от прочности на сжатие и лежит в диапазоне 6–17 % [57]. При этом анизотропия прочности на изгиб в разных направлениях достигает 50 %.

Очевидным технологическим отличием 3D-печати от сборного или монолитного способа изготовления железобетонных изделий является послойность конструкций. Поэтому высокая прочность на границе между экструдированными слоями бетона, обеспечивающая достаточное сопротивление сдвиговым и растягивающим нагрузкам, служит основным требованием к строительным «чернилам».

Проблема в основном возникает при увеличении времени нанесения последующего слоя, что вызывает формирование так называемых «холодных швов» [44, 117]. Однако рецептура строительных чернил, в большей степени связанная с образованием шероховатости поверхности, зависит от размера частиц заполнителя, а также влияет на прочность сцепления слоев [118].

Прочность сцепления слоев, исследованная в работах [5, 6, 87], по растяжению образцов в цилиндрах из напечатанной конструкции, показала важность контроля паузы между нанесением соседних слоев. Варьирование промежутка печати между слоями от единиц минут до 7 суток и сравнение со стандартными образцами показало значительные потери прочности в связи ухудшением сцепления между слоями вследствие формирования холодных швов. То есть для достижения наибольшего сцепления между слоями необходимо стремиться к сокращению задержки печати последовательных слоев.

Особенности составов для 3D-печати связаны с отсутствием, как правило, крупного заполнителя (более 5 мм). Максимальный размер зерен для строительных «чернил» не превышает 2–3 мм [114, 115]. В связи с этим для полного смачивания таких дисперсных систем требуется больше воды, что в свою очередь может приводить к повышению усадки при высыхании.

Усадка бетонных образцов с фиброй, отобранных из напечатанной конструкции, в среднем изменяется в диапазоне 0,177–0,855 мм/м в зависимости от условий твердения [87]. Минимальную усадку имеют образцы, твердеющие в воде, а при выдерживании при относительной влажности 60 % и температуре 20 °С величина усадки находится в верхней границе указанного диапазона.

Технология 3D-печати как альтернатива традиционным способам строительного производства для повышения надежности конструкций требует армирования. Устройство металлической арматуры в послойно нанесенных конструкциях вызывает наибольшие технологические сложности в 3D-печати бетонных материалов.

В работе [98] для армирования конструкций разработали специальное устройство печатающей головки, которое заключается в наличии двух отверстий с противоположенной (задней) стороны от сопла экструдера, позволяющих протягивать металлические стержни параллельно с подачей бетонной смеси. В этом случае арматура располагается на границе между слоями печати. Существуют разработки конструкции сопла экструдера [3], где протягивание металлической проволоки осуществляется в слое экструдированной бетонной смеси. Важным условием в таком случае является достаточная гибкость арматуры для повторения маршрута движения печатающей головки без разрушения формы экструдированного материала. Указанный подход позволяет решить задачу горизонтального армирования, при том что устройство вертикальной арматуры сложное. Возможна ручная подготовка и монтаж арматурных стержней или каркасов, причем как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении [99, 101, 102, 106, 119, 120]. Однако подобный подход снижает технологичность всего процесса строительства с помощью 3D-принтера. Кроме того, расположение арматуры на границе между двумя экструдированными слоями может способствовать формированию «слабой» зоны в конструкции, понижая эффективность армирования [121–123]. Увеличение сцепления между слоями бетонной смеси может быть также реализовано с помощью дополнительного роботизированного механизма, который выполняет внедрение коротких стальных стержней непосредственно перед нанесением бетонной смеси [57]. Альтернативным способом армирования служит использование объемного армирования волокном [6, 33, 93, 124–126] (рис. 9 [5]). При этом используются короткие, тонкие и мягкие волокна (базальтовые, стеклянные, полимерные, углеродные и т.д.), чтобы предотвратить блокировку системы подачи или экструдера вследствие комкования смеси. Для лучшего распределения волокон в смеси фибру добавляют до смешивания сухих компонентов с водой. При подаче бетонной смеси с фиброй происходит выравнивание волокон вдоль

направления экструдирования, что способствует продольному армированию слоя. Это влияет на анизотропию механических свойств. Благодаря высокой площади контакта фибры с цементным камнем обеспечивается высокая прочность сцепления, что также отражается в повышении прочности при изгибе и сжатии до 30 и 100 МПа соответственно [33, 44, 5, 127].

Для продольного армирования, выполненного в процессе формирования слоя, могут применяться леска, металлическая проволока, трос или цепь [55, 128, 129], которые увеличивают прочность на растяжение в конструкции на 82,5 %. При реализации данного метода армирующий материал подается параллельно экструдированному слою бетона через сопло экструдера [57]. Устройство такого подхода представляет собой катушку с проволокой или тросом, закрепленной к печатающей головке. Свободный конец армирующего материала подается через специальное отверстие в сопле, позволяя равномерно разматываться с катушки в момент подачи смеси [129]. Однако первые испытания этого способа армирования свидетельствуют о недостатках, например низкой прочности сцепления с бетоном или проскальзывания при испытании на изгиб, но при достижении больших значений, чем для монолитного бетона [129, 130]. Использование анкерного крепления при такой технологии армирования позволяет избавиться от указанных недостатков [55]. При этом наиболее эффективными являются анкеры из металла наряду с использованием полиэтиленовых, нейлоновых, углеродных и др. Механические характеристики при реализации параллельной подачи армирующего материала могут достигать улучшения до 290 %. В публикациях [124, 131] отмечается, что такой подход приводит к дополнительному воздухововлече-

нию, что выражается в пористой границе между бетоном и армирующим материалом.

Армирование напечатанных бетонных конструкций может быть реализовано введением металлических стержней, монтаж которых осуществляется с помощью специального устройства — инжектора — возле экструзионного сопла. При этом устройство такой арматуры может выполняться как сонаправленно пути печатающей головки, так и разнонаправленно, что позволяет добиваться различного характера и эффекта армирования [37, 132]. Существует опыт использования U-образной, спиральной или криволинейной формы таких стержней [133, 134]. Такое армирование обеспечивало до 142–184 % увеличения прочности на изгиб. Подобный подход может быть эффективен, но реализуется в основном путем ручного введения стержней, особенно неправильной формы.

Армирование напечатанных конструкций возможно с применением стальной сетки, которая с помощью специальной насадки монтируется и удерживается вертикально в продольном направлении, позволяя соплу экструдировать бетонную смесь с двух внешних сторон [135]. Такой подход позволил обеспечить основную функцию армирования конструкций — повысить прочность на изгиб до 170–290 %. Существует опыт [135] возведения вертикального армирующего каркаса мобильным роботом с последующим заполнением пространства внутри него и последующим торкретированием внешних поверхностей. Однако это в большей степени демонстрирует возможности создания металлических каркасов, а бетонирование конструкции в данном случае проведено вручную. То есть автоматизация выполнена лишь частично. При этом имеются примеры [136, 137] использования металлической или полимерной сетки при ручном монтаже между напечатанными на 3D-принтере слоями.

Устройство армирующего материала в межслойном пространстве представляется наиболее простым в реализации на данный момент. Укладка арматурных стержней таким образом обеспечивает требуемую прочность сцепления с бетоном, но выполняется, как правило, вручную и лишь в горизонтальном направлении. Однако устройство металлической составляющей напечатанных конструкций также может быть осуществлено по технологии послойного нанесения [138].

Таким образом, согласно работам [55, 57], исследования по разработке решений для армирования бетонных конструкций, возводимых по технологии 3D-печати, выполнены, как правило, с использованием ручного способа. Большинство попыток автоматизации этого процесса связаны с устройством дополнительных устройств (насадок) к соплу экструдера бетонной смеси. Реализация армирования параллельно процессу экструзии бетона требует проработки ПО и оптимизации цифровых 3D-моделей для генерации металлической составляющей аддитивным способом.

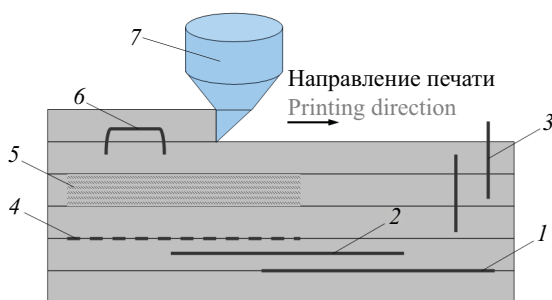


Рис. 9. Способы армирования конструкций, напечатанных 3D-принтером [5]: 1 — стержневая или проволочная арматура между слоями; 2 — стержневая или проволочная арматура внутри слоев; 3 — короткие вертикальные арматурные стержни; 4 — сетка между слоями; 5 — микроволокно (фибра); 6 — U-образные стержни проволоки; 7 — сопло

Fig. 9. Methods of reinforcing 3D printing structures [5]: 1 — rod or wire reinforcement between layers; 2 — rod or wire reinforcement inside the layers; 3 — short vertical reinforcing bars; 4 — mesh between layers; 5 — microfiber (fibre); 6 — U-shaped wire rods; 7 — nozzle

Анализ международных источников позволяет представить общее состояние развития технологии 3D-печати в настоящее время и обозначить пути развития и возникающие при этом проблемы (табл. 2).

Представленные в табл. 2 области совершенствования технологии 3D-печати, технологические решения и возникающие проблемы позволяют сделать следующие важные выводы:

- каждый из существующих способов реализации армирования экструдированных конструкций

имеет свои недостатки и связанные с ними проблемы. Выбор конкретного технологического решения по армированию напечатанных конструкций носит субъективный характер и требует индивидуальной проработки в зависимости от особенностей устройства 3D-принтера;

- для достижения максимальных механических свойств напечатанных конструкций необходима многокритериальная оптимизация, учитывающая реологические требования к смесям (например,

Табл. 2. Основные проблемы технологических решений для 3D-печати в строительстве [4]

Table 2. Main problems of technological solutions for 3D printing in construction [4]

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Прочность на изгиб и растяжение Flexural and tensile strength	Использование металлической фибры Using metal fibre	Повышается прочность на изгиб, но требуется дополнительное армирование для улучшения сопротивления растяжению Flexural strength is increased, but additional reinforcement is required to improve tensile strength
		Прочность существенно зависит от ориентации волокон в объеме Strength depends significantly on the orientation of the fibres in the volume
		Отсутствует объективный способ выбора армирующего волокна There is no objective way to select reinforcing fibres
		Требуется корректировка состава для обеспечения требуемой реологии смесей Adjustment of the composition is required to ensure the required rheology of the mixtures
	Использование углеродной или полимерной фибры Using carbon or polymer fibre	При повышенных температурах волокна плавятся, теряя прочность Fibres melt and lose strength at elevated temperatures
	Укладка/протяжка стержней или проволоки в процессе печати Laying or pulling rods or wires during the printing process	Необходимо обеспечить высокую прочность сцепления арматуры и бетона It is necessary to ensure high adhesion strength between reinforcement and concrete
	Межслойное армирование путем прямого внедрения стержней в напечатанную конструкцию Interlayer reinforcement by direct embedding of bars into the printed structure	В зоне контакта образуются пустоты и искривления напечатанного слоя In the contact area, voids and curvatures of the printed layer are formed
		Нарушается сплошность контакта при увеличении длины внедряемого стержня The continuity of the contact is disrupted when the length of the introduced rod increases
	Управление ориентацией волокон в экструдированном слое Control of fibre orientation in the extruded layer	Устройство армирующих элементов приводит к увеличению времени и сложности печати Installation of reinforcing elements increases the time and complexity of printing
	Использование скоб, колочей проволоки, гвоздей для армирования Use of staples, barbed wire, nails for reinforcement	
Использование армирующих сеток Use of reinforcing mesh	Усложняется печать криволинейных конструкций Printing curved structures becomes more difficult	
	Требуется устройство и связывание сеток во время печати Requires device and mesh binding during printing	
Внешнее армирование External reinforcement	Снижение во времени стойкости к нагрузкам и огню Reduction in resistance to stress and fire over time	

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Прочность сцепления слоев Layer adhesion strength	Использование в составе крупного заполнителя с размером частиц до 5–12 мм для повышения шероховатости поверхности и увеличения площади контакта между ними Use of coarse aggregate with particle sizes up to 5–12 mm to increase surface roughness and increase the contact area between them	Требуются больший размер сопла экструдера и сечения в системе подачи смеси A larger extruder nozzle and cross-section in the mixture supply system are required Повышенный риск блокирования подачи смеси в системе трубопроводов Increased risk of blocking the mixture supply in the piping system Меняется размер и форма печатаемого слоя, что влияет на прочность конструкции The size and shape of the printed layer changes, which affects the strength of the structure
	Использование суперпластификаторов, освобождающих воду в объеме слоев для увеличения влажности на его поверхности Use of superplasticizers that release water in the volume of layers to increase humidity on its surface	Нарушает реологию смеси с заданной удобоукладываемостью, снижается ее формуемость The rheology of the mixture with a given workability is disrupted and its formability is reduced Размеры и геометрия напечатанного образца существенно влияют на время печати и прочность сцепления. Требуются подробные исследования по проектированию и планированию маршрута The dimensions and geometry of the printed sample have a significant impact on print time and adhesion strength. Detailed studies on route design and planning are required
Проектирование составов с заданными механическими свойствами Design of compositions with specified mechanical properties	Разработка высококачественных бетонов с высоким содержанием цемента и более мелкими заполнителями Development of high quality concrete with high cement content and finer aggregates	Повышаются деформации усадки Shrinkage deformations are increased Изменяются режимы приготовления смеси, что влияет на прочностные характеристики Mixture preparation modes are changed, which affects the strength characteristics Требуются решения по частичной замене портландцемента для снижения его расхода без потери прочности Solutions to partially replace Portland cement to reduce its consumption without losing strength are required Требуется повышение размера частиц заполнителя для снижения усадки An increase in aggregate particle size to reduce shrinkage is required
Оптимизация топологии смесей, контроль оплывания и геометрии слоев Optimization of mixture topology, control of slumping and layer geometry	Оптимизация топологии смесей Mix topology optimization	Необходима комплексная оптимизация свойств смесей, обеспечивающая сцепление слоев и учитывающая усадочные и термические деформации A comprehensive optimization of the properties of the mixtures, ensuring adhesion of the layers and taking into account shrinkage and thermal deformations is required Требуется исследование поведения напечатанных конструкций, в том числе на анизотропию из смесей с оптимизированной топологией Investigation of the behavior of printed structures, including anisotropy, from topology-optimized mixtures is required Необходим поиск компромисса между сложностью печатаемой конструкции и простотой устройства арматуры Finding a compromise between the complexity of the printed structure and the simplicity of the fittings is required

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Оптимизация топологии смесей, контроль оплывания и геометрии слоев Optimization of mixture topology, control of slumping and layer geometry	Печать купольных и навесных конструкций Printing of dome and hanging structures	Снижается несущая способность и эстетика из-за ступенчатого вида конструкции Load-bearing capacity and aesthetics are reduced due to the stepped design
	Оптимизация несущих конструкций за счет сочетания при печати материалов разной прочности Optimization of load-bearing structures by combining materials of different strengths when printing	Требуется наличие нескольких сопел или материалов для печати различных элементов составных конструкций Multiple nozzles or materials are required to print various elements of composite structures
	3D-печать опалубки 3D printing of formwork	Сложность организации армирования с использованием металлических стержней или проволоки Difficulty in organizing reinforcement using metal rods or wire
		Сложность транспортировки и монтажа на строительной площадке Difficulty in transportation and installation on a construction site
		Требуется высокая сохраняемость тонкостенной опалубки под влиянием внешней среды High stability of thin-walled formwork under the influence of the external environment is required
	Торкретирование для 3D-печати (роботизированное торкретирование) Shotcrete for 3D printing (robotic shotcrete)	В геометрически сложных конструкциях возрастает сложность размещения арматуры In geometrically complex structures, the complexity of placing reinforcement is increased
Требуется исследование свойств конструкций, изготовленных методом торкретирования 3D-принтером A study of the properties of structures manufactured by shotcrete using a 3D printer is required		
Крупноразмерные системы 3D-печати (3D-принтеры) Large-scale 3D printing systems (3D printers)	Мобильная 3D-печать, передвижной 3D-принтер Mobile 3D printing, mobile 3D printer	1. Точность позиционирования и отклонения при печати протяженных слоев. 2. Сложность совмещения армирования, требований безопасности и погодных условий при организации печати 1. Positioning accuracy and deviations when printing extended layers. 2. The difficulty of combining reinforcement, safety requirements and weather conditions when organizing printing
	3D-печать системой робот-манипулятор 3D printing with a robotic arm system	Конфликт положения между элементами «руки» робота, напечатанными конструкциями и окружающей средой Position conflict between robot arm elements, printed structures, and the environment
	Портальные 3D-принтеры Portal 3D printers	1. Ресурсоемкость сборки/разборки принтера. 2. Ограниченная подвижность экструзионной головки 1. Resource-intensive assembly/disassembly of the printer. 2. Limited mobility of the extrusion head



Рис. 10. Примеры строительных объектов, напечатанных на 3D-принтере компаний Icon Corp. (a); Apis Cor (b) и Cobod Int. (c) [140–142]

Fig. 10. Example of 3D printed construction objects by Icon Corp. (a); Apis Cor (b) and Cobod Int. (c) [140–142]

сочетание экструзируемости и стойкость к оплыванию), особенности армирования (как в объеме слоя (введение фибры), так и устройство металлических элементов (стержней, проволоки и т.д.)) и прочности сцепления слоев (площади поверхности в зоне контакта). При этом усугубляющим фактором является отличие фактической геометрии слоя от проектной, усиливающее анизотропию свойств;

- несмотря на множество вариаций армирования конструкций лишь часть из них может быть автоматизирована и синхронизирована с процессом печати, что также требует совершенствования устройства принтеров для повышения эффективности 3D-печати;

- сложная оптимизация реологии бетонных смесей, особенно наполненных армирующими волокнами, дополняется факторами времени и меняющимися условиями окружающей среды, которые на текущем этапе развития технологии игнорируются или принимаются как незначимые.

В настоящее время одним из существенных вопросов, решение которого будет способствовать развитию технологии 3D-печати, является нормативное регулирование. В большинстве стран, где исследователи демонстрируют успехи в реализации 3D-печати, действующие стандарты формируют консервативную среду нормативного регулирования, ограничивающую внедрение нового подхода к возведению зданий. Несмотря на выдающиеся примеры строительства с использованием 3D-принтеров в США и Европе, таких компаний как Icon Corp., Cobod Int. или Apis Cor (рис. 10), использование таких объектов для жилого назначения без существенных изменений в системе регулирования целесообразнее в странах Африки и Азии, например в Эквадоре или Малайзии, где нормативное регулирование менее строгое [139].

В России уже введены нормативные стандарты, которые направлены в первую очередь на легитимизацию нового подхода к строительству — 3D-печати или аддитивного строительного производства. Новые ГОСТ 59095, 59096 и 59097 «Материалы для аддитивного строительного производства» устанавливают термины и определения, регла-

ментируют технические требования к материалам для 3D-печати и методы оценки их качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный анализ дает возможность сделать выводы о том, что развитие технологии 3D-печати в настоящее время направлено на реализацию надежного масштабирования послойного способа возведения конструкций и его повторяемости с сохранением геометрии и свойств. Ключевые вопросы, которые при этом необходимо решать, связаны с удобоукладываемостью смеси, деформацией и прочностью экструдированного слоя.

Стандартное оборудование для 3D-печати состоит из четырех основных частей: управляющей системы, системы перемещения, системы подачи материала и узла экструдирования (сопла). При этом траектория движения сопла влияет на качество печати, поэтому разработка экструзионных устройств должна основываться на требованиях контролируемой подачи смеси.

Сегодня существует множество примеров составов, преимущественно тяжелого бетона, для 3D-принтеров различного устройства, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Усредненный состав такого бетона содержит по массе 25–45 % вяжущего вещества, как правило портландцемента; 40–65 % заполнителя, представляющего собой кварцевый песок с размером зерна 2–4 мм; воду в количестве не более 15–35 %; а также минеральные добавки, пластификатор и армирующие волокна.

Для повышения эксплуатационных свойств напечатанных конструкций требуется комплексный подход к оптимизации, который бы учитывал реологию смесей, способ армирования и прочность сцепления слоев с учетом изменяющихся внешних факторов.

Общая практика применения технологии 3D-печати, наряду с мелкоштучными архитектурными изделиями, обогащается примерами возведения полноразмерных строительных объектов — зданий в сборном и особенно монолитном исполнении. При этом масштабное внедрение технологии требует разработки методик печати элементов конструк-

ций с учетом анизотропии их свойств в зависимости от направления печати. Для повышения надежности

напечатанных конструкций требуется разработка автоматизированных методов армирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Научная электронная библиотека eLibrary.ru. URL: <https://www.elibrary.ru>
2. Scopus. URL: <https://www.scopus.com>
3. *Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
4. *Raphael B., Senthilnathan S., Patel A., Bhat S.* A review of concrete 3D printed structural members // *Frontiers in Built Environment*. 2023. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1034020
5. *Paul S.C., Zijl G.P.A.G., Tan M.J., Gibson I.* A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects // *Rapid Prototyping Journal*. 2018. Vol. 24. Issue 4. Pp. 784–798. DOI: 10.1108/RPJ-09-2016-0154
6. *Cao X., Yu S., Cui H., Li Z.* 3D printing devices and reinforcing techniques for extruded cement-based materials : a review // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 4. P. 453. DOI: 10.3390/buildings12040453
7. *Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А. и др.* 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3. EDN YNESHX.
8. *Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К.* Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876
9. *Славчева Г.С.* Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36. EDN WACJMY.
10. *Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В.* Технология и контроль качества строительной 3D-печати // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. № 1 (59). С. 64–79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64. EDN BZJGUO.
11. *Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P.* Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — A new processing route for architects and builders // *Material & Design*. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097
12. *Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J.* Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. Pp. 281–288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.165
13. *Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B.* A 3D concrete printing pre-fabrication platform for bespoke columns // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 122. P. 103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
14. *Weng Y., Li M., Ruan S., Wong T.N., Tan M.J., Yeong K.L.O. et al.* Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. P. 121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
15. *Reiter L., Wangler T., Anton A., Flatt R.J.* Setting on demand for digital concrete — Principles, measurements, chemistry, validation // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106047. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106047
16. *Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J.* The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 86–95. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011
17. *Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A.* Evaluating the relationship between deposition and layer quality in large-scale additive manufacturing of concrete // *Virtual and Physical Prototyping*. 2018. Vol. 14. Issue 2. Pp. 135–140. DOI: 10.1080/17452759.2018.1532800
18. *Vantghem G., De Corte W., Shakour E., Amir O.* 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. P. 103084. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103084
19. *Furet B., Poullain P., Garnier S.* 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 28. Pp. 58–64. DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.002
20. *Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.-J., Qian S.* Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 676–685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039
21. *Lim J.H., Weng Y., Pham Q.-C.* 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 232. P. 117075. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075
22. *Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., da Silva W.R.L., Nerella V.N., Fataei S. et al.* Extrusion-

based additive manufacturing with cement-based materials — Production steps, processes, and their underlying physics : a review // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037

23. *Craveiro F., Nazarian S., Bartolo H., Bartolo P.J., Duarte J.P.* An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 33. P. 101146. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101146

24. *Le T.T., 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. Vol. 45. Issue 8. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z

25. D-Shape — steriolithography 3D printing technology. URL: <https://www.d-shape.com>

26. *Wolfs R.J.M.* 3D printing of concrete structures : MSc thesis. Department of Built Environment, Eindhoven University of Technology, 2015. 110 p.

27. *Pierre A., Lanos Ch., Estelle P.* Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation // *Applied Rheology*. 2013. Vol. 23. Issue 6. P. 63849. DOI: 10.3933/applrheol-23-63849

28. *Perrot D., Rangeard A.J.M., Pierre A.* Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques // *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. Issue 4. Pp. 1213–1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0

29. *Anell L.H.* Concrete 3D printer : MSc thesis. Civil Engineering, Lund University, Sweden, 2015. 77 p.

30. *Nerella V.N., Mechtcherine V.* Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D) // *3D Concrete Printing Technology*. 2019. Pp. 333–347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6

31. *Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Bong S.H., Sanjayan J.* Development of 3D printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 257. P. 119546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119546

32. *Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y.* Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. P. 103724. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724

33. *Hambach M., Volkmer D.* Properties of 3D printed fiber-reinforced portland cement paste // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 79. Pp. 62–70. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

34. *Grassi G., Spagnolo S.L., Paoletti I.* Fabrication and durability testing of a 3D printed facade for desert climates // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 28. Pp. 439–444. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.023

35. *Strano M., Rane K., Herve G., Tosi A.* Determination of process induced dimensional variations of

ceramic parts, 3D printed by extrusion of a powder-binder feedstock // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 34. Pp. 560–565. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.220

36. *Villacis N., Gualavisi M., Narvaez-Munoz C., Carrion L., Loza-Matovelle D., Naranjo F.* Additive manufacturing of a theological characterized cement-based composite material // *Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. Bern, Switzerland, 2017. Pp. 326–331.

37. *Perrot A., Jacquet Y., Rangeard D., Courteille E., Sonebi M.* Nailing of layers: a promising way to reinforce concrete 3D printing structures // *Materials*. 2020. Vol. 13. P. 1518. DOI: 10.3390/ma13071518

38. *Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V.* 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165. Pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018

39. *Tho T.P., Thinh N.T.* Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 2. P. 563. DOI: 10.3390/app11020563

40. *Moieni M.A., Hosseinpoor M., Yahia A.* Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 257. P. 119551. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119551

41. *Visser C.R.* Mechanical and structural characterisation of extrusion moulded SHCC : MSc thesis. Stellenbosch : Stellenbosch University, 2007. 116 p.

42. *Kwon H., Bukkapatnam S., Khoshnevis B., Saito J.J.R.P.J.* Effects of orifice shape in contour crafting of ceramic materials // *Rapid Prototyping*. 2002. Vol. 8. Issue 3. Pp. 147–160. DOI: 10.1108/13552540210430988

43. *Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F.* 3D concrete printing: machine and mix design // *International Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 14–22.

44. *Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Pp. 558–666. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003

45. *Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F. et al.* Development in construction-scale additive manufacturing processes // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. Issue 1. Pp. 262–268. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010

46. *El Cheikh K., Remond S., Khalil N., Aouad G.* Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. Pp. 452–463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.032

47. *Olivas A., Hesel M.A., Martys N., Ferraris C., George W.L., Ferron R.* Rheological measurement of

- suspensions without slippage: Experiment and model. National Institute of Standards and Technology, 2016. DOI: 10.6028/NIST.TN.1946
48. *Soltan D.G., Li V.C.* A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017
49. *Vergara L.A., Colorado H.A.* Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, super plasticant and calcium carbonate // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 248. P. 118669. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669
50. *Panda B., Singh G.V.P.B., Unluer C., Tan M.-J.* Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. Pp. 610–619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
51. *Alchaar A.S., Al-Tamimi A.K.* Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 266. P. 120991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120991
52. *Nair S.A.O., Panda S., Santhanam M., Sant G., Neithalath N.* A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112. P. 103671. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103671
53. *He L., Chow W.T., Li H.* Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P. 101390. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101390
54. *Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.* Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications // *Materials*. 2019. Vol. 12. P. 902. DOI: 10.3390/ma12060902
55. *Li Z., Wang L., Ma G.* Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 187. P. 107796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107796
56. *Lin J.C., Wang J., Wu X., Yang W., Zhao R.X., Bao M.* Effect of processing parameters on 3d printing of cement based materials // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 38. P. 03008. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183803008
57. *Krishnaraja A.R., Guru K.V.* 3D printing concrete : a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1055. P. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/1055/1/012033
58. *Rehman A.U., Kim J.-H.* 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics // *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 3800. DOI: 10.3390/ma14143800
59. *Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S.* Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 96–110. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014
60. *Qian Y., De Schutter G.* Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 111. Pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.013
61. *Lee H., Kim J.-H.J., Moon J.-H., Kim W.-W., Seo E.-A.* Experimental analysis on rheological properties for control of concrete extrudability // *Advances in Concrete Construction*. 2020. Vol. 9. Pp. 93–102. DOI: 10.12989/acc.2020.9.1.093
62. *Rahul A.V., Santhanam M.* Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 109. P. 103570. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103570
63. *Mechtcherine V., Nerella V.N., Will F., Nather M., Otto J., Krause M.* Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D printing // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933
64. *Nerella V.N., Beigh M.A.B., Fataei S., Mechtcherine V.* Strain-based approach for measuring structural build-up of cement pastes in the context of digital construction // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 115. Pp. 530–544. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.003
65. *Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.G.* Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature // *In Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Zurich, Switzerland, 2018*. Pp. 3–11.
66. *Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J.* Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
67. *Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 263–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115
68. *Kruger J., Zeranka S., van Zijl G.* An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224. Pp. 372–386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078
69. *Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. Pp. 639–647.

70. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 83. Pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

71. Zhang Ch., Nerella V.N., Krishna A., Wang Sh., Zhang Y., Mechtcherine V. et al. Mix design concepts for 3D printable concrete : a review // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. P. 104155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155

72. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны : монография. СПб. : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. 192 с. EDN UCJRAZ.

73. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Light-weight concrete for 3D printing with internal curing agent for Portland cement hydration // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 1 (109). P. 10915. DOI: 10.34910/MCE.109.15. EDN EPQPUI.

74. Королев Е.В., Зыонг Т.К., Иноземцев А.С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846

75. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. P. 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702010

76. Weng Y., Li M., Tan M.J., Qian S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. Pp. 600–610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112

77. Mahaut F., Mokeddem S., Chateau X., Roussel N., Ovarlez G. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. Issue 11. Pp. 1276–1285. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.06.001

78. Toutou Z., Roussel N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39. Issue 2. Pp. 189–199. DOI: 10.1617/s11527-005-9047-y

79. Noor M.A., Uomoto T. Rheology of high flowing mortar and concrete // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. Issue 272. Pp. 513–521. DOI: 10.1617/13965

80. Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., Kohler M. et al. Digital concrete: opportunities and challenges // *RILEM Technical Letters*. 2016. Vol. 1. Pp. 67–75. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16

81. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 676–685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

82. Chen M., Li L., Zheng Y., Zhao P., Lu L., Cheng X. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 601–611. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037

83. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Issue 1. Pp. 148–157. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.004

84. Ma G., Li Y., Wang L., Zhang J., Li Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. P. 117982. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117982

85. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 110. P. 103571. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103571

86. Suiker A.S.J., Wolfs R.J.M., Lucas S.M., Salet T.A.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 135. P. 106016. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106016

87. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. P. 103344. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103344

88. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Copuroglu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

89. Vaitkevicius V., Serelis E., Kersevicius V. Effect of ultra-sonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 169. Pp. 354–363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.007

90. Xiao J., Zou S., Yu Y., Wang Y., Ding T., Zhu Y. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101779. DOI: 10.1016/j.job.2020.101779

91. Perrot A., Rangeard D. 3D printing in concrete: techniques for extrusion/casting // *3D Printing of Concrete*. 2019. Pp. 41–72.

92. Баженев Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2006. 368 с. EDN QNMNZZ.

93. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J. et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials // *Construction and Building Ma-*

- terials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144
94. *Wangler T.* Digital concrete: research and applications // Proceedings of the 10th International Concrete Congress. 2019. Vol. 35. Pp. 2–12.
95. *Al Rashid A., Khan S.A., Al-Ghamdi S.G., Koc M.* Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment // Automation in Construction. 2020. Vol. 118. P. 103268. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103268
96. *Roussel N.* A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. Pp. 1797–1806. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025
97. *Panda B., Unluer C., Tan M.J.* Investigation of the rheology and strength of geopolymers for extrusion-based 3D printing // Cement and Concrete Composites. 2018. Vol. 94. Pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002
98. *Panda B., Tan M.J.* Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Pp. 10258–10265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031
99. *Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z.* 3D printable concrete: Mixture design and test methods // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 97. Pp. 13–23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
100. *Nerella V., Nather M., Iqbal A., Butler M., Mechtcherine V.J.C.* Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 95. Pp. 260–270. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015
101. *Panda B., Mohamed N., Ahamed N., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J. et al.* The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete // Materials. 2019. Vol. 12. P. 2149. DOI: 10.3390/ma12132149
102. *Chen M., Yang L., Zheng Y., Huang Y., Li L., Zhao P. et al.* Yield stress and thixotropy control of 3D printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 252. P. 119090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119090
103. *Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G., Thorpe T.J.M.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. Vol. 45. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z
104. *Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 201. Pp. 278–285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
105. *Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N.* Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 123. P. 105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
106. *Kruger J., Cho S., Zeranka S., Viljoen C., van Zijl G.* 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 183. P. 107660. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107660
107. *Jolin M., Burns D., Bissonnette B., Gagnon F., Bolduc L.S.* Understanding the pumpability of concrete // Proceedings for the conference Shotcrete for Underground Support (XI). Davos, Switzerland. 2009.
108. *Mechtcherine V., Nerella V.N., Kasten K.* Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 53. Pp. 312–323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.037
109. *Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J.* Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 174. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
110. *Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V.* Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results // Journal of ASTM International. 2009. Vol. 7. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1520/JAI102003
111. *Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G.* Evaluating the influence of aggregate content on pumpability of 3D printable concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 333–341.
112. *Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G.* Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 139. P. 106258. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106258
113. *Matthaus C., Back D., Weger D., Krankel T., Scheydt J., Gehlen C.* Effect of cement type and limestone powder content on extrudability of lightweight concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 312–322.
114. *Zhou C., Chen R., Xu J., Ding L., Luo H., Fan J. et al.* In-situ construction method for lunar habitation: Chinese Super Mason // Automation in Construction. 2019. Vol. 104. Pp. 66–79. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.024
115. *Burry J., Sabin J.E., Sheil B., Skavara M.* Fabricate 2020. UCL Press: London, UK. 2020. 140 p.
116. *Jeong H., Han S.-J., Choi S.-H., Lee Y.J., Yi S.T., Kim K.S.* Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete // Materials. 2019. Vol. 12. P. 657. DOI: 10.3390/ma12040657
117. *Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J.* Measurement of tensile bond

strength of 3D printed geopolymers mortar // Measurement. 2018. Vol. 113. Pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051

118. *Zareyan B., Khoshnevis B.* Interlayer adhesion and strength of structures in contour crafting — effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness // Automation in Construction. 2017. Vol. 81. Pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013

119. *Katzer J., Szatkiewicz T.* Properties of concrete elements with 3D printed formworks which substitute steel reinforcement // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 210. Pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.204

120. *Salazar B., Aghdasi P., Williams I.D., Ostertag C.P., Taylor H.K.* Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete // Materials & Design. 2020. Vol. 196. P. 109184. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109184

121. *Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 172. Pp. 468–475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

122. *Van Der Putten J., Deprez M., Cnudde V., De Schutter G., Van Tittelboom K.* Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials // Materials. 2019. Vol. 12. P. 2993. DOI: 10.3390/ma12182993

123. *Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K.* Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials // RILEM Technical Letters. 2019. Vol. 4. Pp. 33–38.

124. *Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J.* Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 202. Pp. 770–783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008

125. *Ogura H., Nerella V.N., Mechtcherine V.* Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D printing // Materials. 2018. Vol. 11. P. 1375. DOI: 10.3390/ma11081375

126. *Farina I., Fabbrocino F., Carpentieri G., Modano M., Amendola A., Goodall R. et al.* On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 90. Pp. 76–85. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.006

127. *Rubio M., Sonebi M., Amziane S.* Fresh and rheological properties of 3D printing bio-cement-based materials // Academic Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 35. Pp. 283–290.

128. *Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J., Salet T.A.* 3D printing concrete with reinforcement // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. 2018. Pp. 2484–2493.

129. *Bos F.P., Ahmed Z.Y., Jutinov E.R., Salet T.A.M.* Experimental exploration of metal cable as

reinforcement in 3D printed concrete // Materials. 2017. Vol. 10. P. 1314. DOI: 10.3390/ma10111314

130. *Mechtcherine V., Michael A., Liebscher M., Schmeier T.* Extrusion-based additive manufacturing with carbon reinforced concrete: concept and feasibility study // Materials. 2020. Vol. 13. P. 2568. DOI: 10.3390/ma13112568

131. *Bos F., Dezaire S., Ahmed Z., Hoekstra A., Salet T.* Bond of reinforcement cable in 3D printed concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 584–600.

132. *Bester F., van den Heever M., Kruger J., Cho S., van Zijl G.* Steel fiber links in 3D printed concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 398–406.

133. *Geneidy O., Kumarji S., Dubor A., Sollazzo A.* Simultaneous reinforcement of concrete while 3D printing // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 895–905.

134. *Marchment T., Sanjayan J.* Penetration reinforcing method for 3D concrete printing // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 680–690.

135. *Marchment T., Sanjayan J.* Mesh reinforcing method for 3D concrete printing // Automation in Construction. 2020. Vol. 109. P. 102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992

136. *Wang W., Konstantinidis N., Austin S.A., Buswell R.A., Cavalaro S., Cecinia D.* Flexural behaviour of AR-glass textile reinforced 3D printed concrete beams // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 728–737.

137. *Lin A., Tan Y.K., Wang C.-H., Kua H.W., Taylor H.* Utilization of waste materials in a novel mortar-polymer laminar composite to be applied in construction 3D printing // Composite Structures. 2020. Vol. 253. P. 112764. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112764

138. *Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Fussel U.* 3D printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behavior // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

139. Regulation and permitting for 3D printed construction — automate construction. URL: <https://automate.construction/2020/03/29/regulation-and-permitting-for-3d-printed-construction>

140. ICON — 3D Technology. ICON develops advanced construction technologies that advance humanity by using 3D printing robotics, software and advanced materials. URL: <https://www.iconbuild.com>

141. Apis Cor. We print buildings. URL: <https://apis-cor.com>

142. COBOD. COBOD is the world leader in 3D construction printing solutions. We are continuously adding wider automation and robotics to construction. URL: <https://cobod.com>

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru.

REFERENCES

1. *Scientific electronic library eLibrary.ru*. URL: <https://www.elibrary.ru> (rus.).
2. *Scopus*. URL: <https://www.scopus.com>
3. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
4. Raphael B., Senthilnathan S., Patel A., Bhat S. A review of concrete 3D printed structural members. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1034020
5. Paul S.C., Zijl G.P.A.G., Tan M.J., Gibson I. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*. 2018; 24(4):784-798. DOI: 10.1108/RPJ-09-2016-0154
6. Cao X., Yu S., Cui H., Li Z. 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials : a review. *Buildings*. 2022; 12(4):453. DOI: 10.3390/buildings12040453
7. Vatin N., Chumadova L., Goncharov I., Zyкова V., Karpenya A., Kim A. et al. 3D printing in construction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 1(52):27-46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3. EDN YNESHX. (rus.).
8. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong Thanh Qui. Analysis of existing technological solutions of 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):(118):863-876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876 (rus.).
9. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Construction Materials*. 2021; 5:28-36. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36. EDN WACJMY. (rus.).
10. Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of 3DCP. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; 1(59):64-79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64. EDN BZJGUO. (rus.).
11. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — A new processing route for architects and builders. *Material & Design*. 2016; 100:102-109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097
12. Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 167:281-288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.165
13. Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B. A 3D concrete printing pre-fabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction*. 2020; 122:103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
14. Weng Y., Li M., Ruan S., Wong T.N., Tan M.J., Yeong K.L.O. et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a pre-cast approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 261:121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
15. Reiter L., Wangler T., Anton A., Flatt R.J. Setting on demand for digital concrete — Principles, measurements, chemistry, validation. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106047. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106047
16. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:86-95. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011
17. Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A. Evaluating the relationship between deposition and layer quality in large-scale additive manufacturing of concrete. *Virtual and Physical Prototyping*. 2018; 14(2):135-140. DOI: 10.1080/17452759.2018.1532800
18. Vantighem G., De Corte W., Shakour E., Amir O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in*

Construction. 2020; 112:103084. DOI: 10.1016/j.aut-con.2020.103084

19. Furet B., Poullain P., Garnier S. 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*. 2019; 28:58-64. DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.002

20. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.-J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:676-685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

21. Lim J.H., Weng Y., Pham Q.-C. 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials*. 2020; 232:117075. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075

22. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., da Silva W.R.L., Nerella V.N., Fataei S. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials — Production steps, processes, and their underlying physics : a review. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037

23. Craveiro F., Nazarian S., Bartolo H., Bartolo P.J., Duarte J.P. An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials. *Additive Manufacturing*. 2020; 33:101146. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101146

24. Le T.T., 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; 45(8):1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z

25. *D-Shape — steriolithography 3D printing technology*. URL: <https://www.d-shape.com>

26. Wolfs R.J.M. *3D Printing of Concrete Structures : MSc thesis*. Department of Built Environment, Eindhoven University of Technology, 2015; 110.

27. Pierre A., Lanos Ch., Estelle P. Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation. *Applied Rheology*. 2013; 23(6):63849. DOI: 10.3933/applrheol-23-63849

28. Perrot D., Rangeard A.J.M., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016; 49(4):1213-1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0

29. Anell L.H. *Concrete 3D printer : MSc thesis*. Civil Engineering, Lund University, Wseden, 2015; 77.

30. Nerella V.N., Mechtcherine V. Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D). *3D Concrete Printing Technology*. 2019; 333-347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6

31. Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Bong S.H., Sanjayan J. Development of 3D printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119546

32. Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 113:103724. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724

33. Hambach M., Volkmer D. Properties of 3D printed fiber-reinforced portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 79:62-70. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

34. Grassi G., Spagnolo S.L., Paoletti I. Fabrication and durability testing of a 3D printed façade for desert climates. *Additive Manufacturing*. 2019; 28:439-444. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.023

35. Strano M., Rane K., Herve G., Tosi A. Determination of process induced dimensional variations of ceramic parts, 3D printed by extrusion of a powder-binder feedstock. *Procedia Manufacturing*. 2019; 34:560-565. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.220

36. Villacis N., Gualavisi M., Narvaez-Munoz C., Carrion L., Loza-Matovelle D., Naranjo F. Additive manufacturing of a theological characterized cement-based composite material. *Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. 2017; 326-331.

37. Perrot A., Jacquet Y., Rangeard D., Courteille E., Sonebi M. Nailing of layers: a promising way to reinforce concrete 3D printing structures. *Materials*. 2020; 13:1518. DOI: 10.3390/ma13071518

38. Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*. 2018; 165:218-231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018

39. Tho T.P., Thinh N.T. Using a Cable-Driven Parallel Robot with Applications in 3D Concrete Printing. *Applied Sciences*. 2021; 11(2):563. DOI: 10.3390/app11020563

40. Moeini M.A., Hosseinpoor M., Yahia A. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119551. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119551

41. Visser C.R. *Mechanical and structural characterisation of extrusion moulded SHCC : MSc thesis*. Stellenbosch, Stellenbosch University, 2007.

42. Kwon H., Bukkapatnam S., Khoshnevis B., Saito J.J.R.P.J. Effects of orifice shape in contour crafting of ceramic materials. *Rapid Prototyping*. 2002; 8(3):147-160. DOI: 10.1108/13552540210430988

43. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015; 6(6):14-22.

44. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42:558-666. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003

45. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Development in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012; 21(1):262-268. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010
46. El Cheikh K., Remond S., Khalil N., Aouad G. Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials*. 2017; 145:452-463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.032
47. Olivas A., Helsel M.A., Martys N., Ferraris C., George W.L., Ferron R. *Rheological Measurement of Suspensions Without Slippage: Experiment and Model*. National Institute of Standards and Technology, 2016. DOI: 10.6028/NIST.TN.1946
48. Soltan D.G., Li V.C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 90:1-13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017
49. Vergara L.A., Colorado H.A. Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, super plasticant and calcium carbonate. *Construction and Building Materials*. 2020; 248:118669. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669
50. Panda B., Singh G.V.P.B., Unluer C., Tan M.-J. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 220:610-619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
51. Alchaar A.S., Al-Tamimi A.K. Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; 266:120991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120991
52. Nair S.A.O., Panda S., Santhanam M., Sant G., Neithalath N. A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 112:103671. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103671
53. He L., Chow W.T., Li H. Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste. *Additive Manufacturing*. 2020; 36:101390. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101390
54. Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J. Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications. *Materials*. 2019; 12:902. DOI: 10.3390/ma12060902
55. Li Z., Wang L., Ma G. Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 187:107796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107796
56. Lin J.C., Wang J., Wu X., Yang W., Zhao R.X., Bao M. Effect of processing parameters on 3D printing of cement based materials. *E3S Web of Conferences*. 2018; 38:03008. DOI: 10.1051/e3sconf/20183803008
57. Krishnaraja A.R., Guru K.V. 3D Printing Concrete : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1055:012033. DOI: 10.1088/1757-899X/1055/1/012033
58. Rehman A.U., Kim J.-H. 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. *Materials*. 2021; 14:3800. DOI: 10.3390/ma14143800
59. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:96-110. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014
60. Qian Y., De Schutter G. Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE). *Cement and Concrete Research*. 2018; 111:15-22. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.013
61. Lee H., Kim J.-H. J., Moon J.-H., Kim W.-W., Seo E.-A. Experimental analysis on rheological properties for control of concrete extrudability. *Advances in Concrete Construction*. 2020; 9:93-102. DOI: 10.12989/acc.2020.9.1.093
62. Rahul A.V., Santhanam M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 109:103570. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103570
63. Mechtcherine V., Nerella V.N., Will F., Nather M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D printing. *Automation in Construction*. 2019; 107:102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933
64. Nerella V.N., Beigh M.A.B., Fataei S., Mechtcherine V. Strain-based approach for measuring structural build-up of cement pastes in the context of digital construction. *Cement and Concrete Research*. 2019; 115:530-544. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.003
65. Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.G. Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature. *Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2018; 3-11.
66. Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 174:106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
67. Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*. 2018; 174:263-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115
68. Kruger J., Zeranka S., van Zijl G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 224:372-386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078
69. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D

printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*. 2017; 145:639-647.

70. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 83:146-159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

71. Zhang Ch., Nerella V.N., Krishna A., Wang Sh., Zhang Y., Mechtcherine V. et al. Mix design concepts for 3D printable concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 122:104155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155

72. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. *High-strength lightweight concrete*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022; 192. EDN UCJRAZ. (rus.).

73. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Lightweight concrete for 3D printing with internal curing agent for Portland cement hydration. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 1(109):10915. DOI: 10.34910/MCE.109.15. EDN EPQPUI.

74. Korolev E.V., Thanh Qui Duong, Inozemtcev A.S. Method of internal care of cement hydration in 3D printing formulations. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(6):834-846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846 (rus.).

75. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702010

76. Weng Y., Li M., Tan M.J., Qian S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials*. 2018; 163:600-610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112

77. Mahaut F., Mokeddem S., Chateau X., Roussel N., Ovarlez G. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(11):1276-1285. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.06.001

78. Toutou Z., Roussel N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. *Materials and Structures*. 2006; 39(2):189-199. DOI: 10.1617/s11527-005-9047-y

79. Noor M.A., Uomoto T. Rheology of high flowing mortar and concrete. *Materials and Structures*. 2004; 37(272):513-521. DOI: 10.1617/13965

80. Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., Kohler M. et al. Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*. 2016; 1:67-75. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16

81. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:676-685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

82. Chen M., Li L., Zheng Y., Zhao P., Lu L., Cheng X. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:601-611. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037

83. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(1):148-157. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.004

84. Ma G., Li Y., Wang L., Zhang J., Li Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials*. 2020; 241:117982. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117982

85. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 110:103571. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103571

86. Suiker A.S.J., Wolfs R.J.M., Lucas S.M., Salet T.A.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing. *Cement and Concrete Research*. 2020; 135:106016. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106016

87. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 104:103344. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103344

88. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Copuroglu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

89. Vaitkevicius V., Serelis E., Kersevicius V. Effect of ultra-sonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology. *Construction and Building Materials*. 2018; 169:354-363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.007

90. Xiao J., Zou S., Yu Y., Wang Y., Ding T., Zhu Y. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101779. DOI: 10.1016/j.job.2020.101779

91. Perrot A., Rängeard D. 3D printing in concrete: techniques for extrusion/casting. *3D Printing of Concrete*. Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2019; 41-72.

92. Bazhenov Yu.M. *Modified high quality concretes*. Moscow, ASV publisher, 2006; 368. EDN QNMNZZ. (rus.).

93. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019; 207:477-490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

94. Wangler T. Digital concrete: research and applications. *Proceedings of the 10th International Concrete Congress*. 2019; 35:2-12.
95. Al Rashid A., Khan S.A., Al-Ghamdi S.G., Koc M. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*. 2020; 118:103268. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103268
96. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36:1797-1806. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025
97. Panda B., Unluer C., Tan M.J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 94:307-314. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002
98. Panda B., Tan M.J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*. 2018; 44:10258-10265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031
99. Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 97:13-23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
100. Nerella V., Nather M., Iqbal A., Butler M., Mechtcherine V.J.C. Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 95:260-270. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015
101. Panda B., Mohamed N., Ahamed N., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J. et al. *The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete*. *Materials*. 2019; 12:2149. DOI: 10.3390/ma12132149
102. Chen M., Yang L., Zheng Y., Huang Y., Li L., Zhao P. et al. Yield stress and thixotropy control of 3D printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*. 2020; 252:119090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119090
103. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G., Thorpe T.J.M. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012; 45:1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z
104. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 201:278-285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
105. Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*. 2019; 123:105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
106. Kruger J., Cho S., Zeranka S., Viljoen C., van Zijl G. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 183:107660. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107660
107. Jolin M., Burns D., Bissonnette B., Gagnon F., Bolduc L.S. Understanding the pumpability of concrete. *Proceedings for the conference Shotcrete for Underground Support (XI)*. Davos, Switzerland, 2009.
108. Mechtcherine V., Nerella V.N., Kasten K. Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. *Construction and Building Materials*. 2014; 53:312-323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.037
109. Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 174:106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
110. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results. *Journal of ASTM International*. 2009; 7(1):1-10. DOI: 10.1520/JAI102003
111. Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G. Evaluating the influence of aggregate content on pumpability of 3D printable concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 333-341.
112. Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. *Cement and Concrete Research*. 2021; 139:106258. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106258
113. Matthaus C., Back D., Weger D., Krankel T., Scheydt J., Gehlen C. Effect of cement type and limestone powder content on extrudability of lightweight concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 312-322.
114. Zhou C., Chen R., Xu J., Ding L., Luo H., Fan J. et al. In-situ construction method for lunar habitation: Chinese Super Mason. *Automation in Construction*. 2019; 104:66-79. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.024
115. Burry J., Sabin J.E., Sheil B., Skavara M. *Fabricate 2020*. UCL Press, London, UK, 2020; 140.
116. Jeong H., Han S.-J., Choi S.-H., Lee Y.J., Yi S.T., Kim K.S. Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete. *Materials*. 2019; 12:657. DOI: 10.3390/ma12040657
117. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. *Measurement*. 2018; 113:108-116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051

118. Zareiyan B., Khoshnevis B. Interlayer adhesion and strength of structures in contour crafting — effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness. *Automation in Construction*. 2017; 81:112-121. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013

119. Katzer J., Szatkiewicz T. Properties of concrete elements with 3D printed formworks which substitute steel reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2019; 210:157-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.204

120. Salazar B., Aghdasi P., Williams I.D., Ostagtag C.P., Taylor H.K. Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. *Materials & Design*. 2020; 196:109184. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109184

121. Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 172:468-475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

122. Van Der Putten J., Deprez M., Cnudde V., De Schutter G., Van Tittelboom K. *Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials*. *Materials*. 2019; 12:2993. DOI: 10.3390/ma12182993

123. Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K. Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials. *RILEM Technical Letters*. 2019; 4:33-38.

124. Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2019; 202:770-783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008

125. Ogura H., Nerella V.N., Mechtcherine V. *Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D printing*. *Materials*. 2018; 11:1375. DOI: 10.3390/ma11081375

126. Farina I., Fabbrocino F., Carpentieri G., Modano M., Amendola A., Goodall R. et al. On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 90:76-85. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.006

127. Rubio M., Sonebi M., Amziane S. Fresh and rheological properties of 3D printing bio-cement-based materials. *Academic Journal of Civil Engineering*. 2017; 35:283-290.

128. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J., Salet T.A. 3D printing concrete with reinforcement. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. 2018; 2484-2493.

129. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Jutinov E.R., Salet T.A.M. *Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete*. *Materials*. 2017; 10:1314. DOI: 10.3390/ma10111314

130. Mechtcherine V., Michael A., Liebscher M., Schmeier T. *Extrusion-based additive manufacturing with carbon reinforced concrete: concept and feasibility study*. *Materials*. 2020; 13:2568. DOI: 10.3390/ma13112568

131. Bos F., Dezaire S., Ahmed Z., Hoekstra A., Salet T. Bond of reinforcement cable in 3D printed concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 584-600.

132. Bester F., van den Heever M., Kruger J., Cho S., van Zijl G. Steel fiber links in 3D printed concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 398-406.

133. Geneidy O., Kumarji S., Dubor A., Sollazzo A. Simultaneous reinforcement of concrete while 3D printing. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 895-905.

134. Marchment T., Sanjayan J. Penetration reinforcing method for 3D concrete printing. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 680-690.

135. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing. *Automation in Construction*. 2020; 109:102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992

136. Wang W., Konstantinidis N., Austin S.A., Buswell R.A., Cavalaro S., Cecinia D. Flexural behaviour of AR-glass textile reinforced 3D printed concrete beams. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 728-737.

137. Lin A., Tan Y.K., Wang C.-H., Kua H.W., Taylor H. Utilization of waste materials in a novel mortar-polymer laminar composite to be applied in construction 3D printing. *Composite Structures*. 2020; 253:112764. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112764

138. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Fussel U. 3D printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behavior. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

139. *Regulation and Permitting for 3D Printed Construction — Automate Construction*. URL: <https://automate.construction/2020/03/29/regulation-and-permitting-for-3d-printed-construction>

140. ICON — 3D Technology. *ICON develops advanced construction technologies that advance humanity by using 3D printing robotics, software and advanced materials*. URL: <https://www.iconbuild.com>

141. Apis Cor. *We print buildings*. URL: <https://apis-cor.com>

142. COBOD. COBOD is the world leader in 3D construction printing solutions. *We are continuously adding wider automation and robotics to construction*. 2023. URL: <https://cobod.com>

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on December 1, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S: **Aleksandr S. Inozemtcev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.