



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64
УДК 69.05, 691.3

Технология и контроль качества строительной 3D-печати

Р.Х. Мухаметрахимов¹, Л.В. Зиганшина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: Несовершенство строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии, выражающееся в образовании дефектов и отклонений, одной из причин которых является отсутствие системы контроля качества строительной 3D-печати обуславливает актуальность решаемой проблемы. Цель исследований – разработать состав операций и средства контроля при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Результаты. Исследовано влияние особенностей подготовки цифровой модели, реотехнологических характеристик смеси (подвижности и предельного напряжения сдвига) на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере. Для получения изделий на 3D-принтере с требуемой длиной необходимо учитывать особенности при формировании G-code трехмерной цифровой модели: удлинения образца на величину, вызванного растеканием сырьевой смеси, а также удлинение образца на величину расстояния от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани в начальном и конечном положениях сопла. Для малоподвижных смесей характерно преимущественно образование дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности при отсутствии расплыва. Более подвижные смеси отличаются большей степенью образования дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва, однако дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют. Зависимость геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати, выражается линейной функцией $\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31$. На основе выявленных особенностей аддитивного производства методом послойной экструзии предложены основные положения организации и осуществления контроля качества методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в снижении образования дефектов получаемой продукции методом послойной экструзии (3D-печати) за счет совершенствования системы контроля качества при аддитивном производстве с учетом влияния особенностей моделирования цифровой модели изделия, реотехнологических характеристик смеси, а также состава операций и средств контроля при входном, операционном и приемочном контроле.

Ключевые слова: бетоны, растворы, реология, 3D-печать, 3DCP, аддитивные технологии, технология и организация строительства, контроль качества.

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С 64-79.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64

Technology and quality control of 3DCP

R. Kh. Mukhametrakhimov¹, L.V. Ziganshina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

Abstract: Relevance of the problem being solved is caused by the imperfection of 3DCP products, which is expressed in the formation of defects and deviations, one of the reasons for which is the lack of a quality control system for 3DCP. The purpose of the research is to develop the composition of operations and control tools for the additive manufacturing (3DCP).

The influence of the features of CAD-model preparation, rheological and technological characteristics of the mixture (mobility and yield strength) on the quality of construction products printed on a 3D printer has been studied. It is necessary to take into account the features in the formation of the G-code of a CAD-model to obtain products on a 3D printer with the required length: elongation of the sample by an amount caused by the spreading of the raw mixture, as well as elongation of the sample by the distance from the center of gravity of the extruded raw mixture to its face in the initial and end positions of the nozzle. Nonmobile mixtures are characterized mainly by the formation of defects as a violation of geometry, straightness, gaps between layers and along the length of the layer, thickness differences, and the absence of spread. More mobile mixtures are characterized by a greater degree of formation of defects as geometry violations, straightness, thickness variation, flow, however, there are no defects as gaps between layers and along the length of the layer. The dependence of the geometric deviations of the length of printed sample, which is a multilayer strip, on the limiting shear stress of the mixture, under constant 3D printing modes, is expressed by a linear function $\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31$. Based on the identified features of 3DCP, the main provisions for the organization and implementation of quality control of 3DCP are proposed, which establish the composition of operations and means of control during the work performance.

Significance of the obtained results for the construction industry consists in reducing the defects in 3DCP products by improving the quality control system in additive manufacturing, taking into account the influence of the features of CAD-modeling, rheological and technological characteristics of the mixture, as well as the composition of operations and control tools during incoming, operational and acceptance control.

Keywords: concrete, rheology, 3D printing, 3DCP, additive technologies, construction technology and management, quality control.

For citation: Mukhametrakhimov R. Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of 3DCP//News KSUAE 2022 № 1(59). С 64-79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64

1. Введение

В различных отраслях промышленности, в том числе строительстве, наблюдается широкое применение инновационных технологий в направлении развития и внедрения средств автоматизации и роботизации при производстве [1–3].

Одной из таких активно развивающихся инновационных технологий в области строительства является применение аддитивных технологических процессов, позволяющих изготавливать детали, изделия, конструкции, каркасы зданий и сооружений на основе создания физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [4].

Перспективы превосходства аддитивных технологий в строительной отрасли по отношению к традиционным подходам отмечают многие авторы в своих работах [5–14] благодаря значительному сокращению сроков строительства и трудозатрат, возможности изготовления изделий различной конфигурации, отсутствию существенных отходов при

производстве, экономической выгоде, обеспечению сохранности окружающей среды и повышению безопасности жизнедеятельности в процессе самого производства.

Исследования в данной области реализуются в различных научных школах, основными из которых являются НИУ МГСУ [15–17], БГТУ им. В.Г. Шухова [3,18–20], ВГТУ [21–23], КГАСУ [24–26] и др.

Согласно ГОСТ 57590-2017 [27] выделяется семь основных категорий аддитивных процессов (фотополимеризация в ванне, струйное нанесение материала, струйное нанесение связующего, синтез на подложке, экструзия материала, прямой подвод энергии и материала и листовая ламинация). Наиболее широкое распространение в строительстве получил метод послойной экструзии материала с применением сырьевых смесей на основе минеральных вяжущих, главным образом, портландцемента [12,28–34].

Технология формования бетонов методом послойной экструзии это взаимосвязанные процессы и способы переработки сырьевых компонентов. Основными элементами технологии являются сырье, энергия и аппаратура (оборудование), которые тесно взаимосвязаны и обусловлены экономическими и научно-техническими аспектами [35].

Опираясь на работы В.И. Теличенко, О.М. Терентьева, А.А. Лapidуса [36] можно сформулировать, что технология аддитивного строительного производства с научной точки зрения рассматривает теоретические основы, способы и методы выполнения строительных процессов, обеспечивающих обработку полуфабрикатов (растворных и бетонных смесей) с качественным изменением их состояния, физико-механических свойств, геометрических размеров с целью получения продукции требуемого качества.

Несмотря на ряд работ, свидетельствующих о существенном расширении областей применения аддитивного производства в строительстве, следует отметить, что строительная продукция характеризуется дефектами и отклонениями, выражающимися в растрескивании смеси, наличии разрывов, изломов, пустот, пониженной трещиностойкости и др. [25,31,37–39], одной из причин которых является несовершенство системы контроля качества при 3D-печати.

При этом стоит отметить, что некоторые требования к методам контроля качества изделий, полученных в технологиях аддитивного производства (в т.ч. методом строительной 3D-печати) изложены в [40], однако данные требования носят общий характер, а область применения норматива распространяется на широкий спектр существующих технологий аддитивного производства, не учитывая технологические особенности каждого из них.

Таким образом, особую актуальность приобретают работы, направленные на изучение особенностей технологии производства и контроля качества работ при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Цель работы – разработать состав операций и средства контроля при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Для это необходимо решить следующие задачи:

– исследовать влияние подвижности сырьевой смеси на качество строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии (3D-печати);

– определить особенности формирования G-code трехмерной цифровой модели и растрескивания смеси в процессе экструзии на геометрические отклонения затвердевших композитов;

– установить зависимости геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати;

– разработать основные положения организации и осуществления контроля качества при возведении строительной продукции методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Объект исследований – процессы аддитивного строительного производства.

Предмет исследований – контролируемые операции, методы, объем и средства контроля аддитивного строительного производства.

2. Материалы и методы

Исследования выполнялись в лаборатории аддитивных технологий строительного производства в ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

При создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) осуществляли следующую последовательность технологических операций:

1. Создание цифровой трёхмерной модели объекта;
2. Деление модели на слои в поперечном сечении;
3. Перевод модели в цифровые данные на языке программирования G-code, позволяющем моделировать, формировать коды и управлять 3D-принтером;
4. Приготовление сырьевой смеси с заданными свойствами, и ее подача в съёмный накопительный бункер строительного 3D-принтера;
5. Передача разработанного кода на печатающую головку-экструдер;
6. Послойная экструзия сырьевой смеси в соответствии с заданной цифровой трёхмерной моделью;
7. Отверждение материала до завершения формирования объекта (изделия);
8. Постобработка: удаление поддерживающей структуры (при необходимости).

Для 3D-печати использовали сырьевую смесь, включающую следующие исходные компоненты:

а) портландцемент: ЦЕМ I 42,5 Н производства филиала «Сулоложскцемент» (холдинг SLK Cement) по ГОСТ 31108-2016;

б) мелкий заполнитель: кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,3$ по ГОСТ 8736-2014;

в) водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Перемешивание компонентов сырьевой смеси производили в бетоносмесителе принудительного действия в течение 10 минут до получения однородной массы.

Подвижность смеси определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 5802-86 по глубине погружения в нее эталонного конуса.

Предельное напряжение сдвига смеси определялось на границе гравитационной растекаемости при помощи простейшего вискозиметра, представляющего собой полый цилиндр из полипропилена высотой 200 мм, внутренним диаметром 105 мм, в соответствии с методикой [41].

3D-печать образцов из сырьевой смеси осуществлялось методом послойной экструзии на порталном цеховом строительном 3D-принтере «АМТ S-6044» (ООО «СПЕЦАВИА», г. Ярославль), посредством ее печати по заранее разработанной трёхмерной цифровой модели (G-code).

Напечатанные образцы твердели в течение 28 суток в естественных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, относительной влажности воздуха $(50 \pm 20)\%$.

Контроль качества напечатанного на 3D-принтере изделия включал в себя визуальный и измерительный методы. Измерительный контроль произведен с использованием металлической линейки по ГОСТ 427-75, металлической рулетки по ГОСТ 7502-98 и увеличительной лупы по ГОСТ 25706-83.

3. Результаты и обсуждение

Создаваемая продукция на строительном 3D-принтере должна соответствовать предъявляемым к ней требованиям проектной и нормативной документации, отступление от которых может привести к получению некачественных изделий с различными дефектами, одной из причин которых может являться не оптимальность подобранных составов бетонных смесей и технологических параметров (подвижности).

В этой связи на первом этапе изучена роль подготовки цифровой модели, а также влияние подвижности и предельного напряжения сдвига смеси на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере.

Исследовано качество напечатанных на 3D-принтере изделий трех составов, отличающихся подвижностью: состав № 1 – с чрезмерной подвижностью и низким значением предельного напряжения сдвига, состав № 2 – с недостаточной подвижностью и высоким значением предельного напряжения сдвига, состав № 3 – с подвижностью и

пределным напряжением сдвига, близкими к оптимальным значениям. Результаты контроля напечатанной на 3D-принтере скамейки приведены на рис. 1, в таблице 1.



Рис. 1. 3D-печать изделия сырьевыми смесями с различной подвижностью: а – смесь состава №1; б – смесь состава №2; в – смесь состава №3 (иллюстрация авторов)

Таблица 1
Результаты визуального и измерительного контроля изделий, напечатанных на 3D-принтере

Наименование дефекта	Характеристики дефекта		
	Состав №1	Состав №2	Состав №3
1	2	3	4
нарушение геометрии	более значительно	значительно	значительно
нарушение прямолинейности	более значительно	значительно	значительно
разрывы между слоями	отсутствуют	значительно	не значительно
разрывы по длине слоя	отсутствуют	значительно	отсутствуют
разнотолщинность	более значительно	значительно	отсутствуют
распływ	более значительно	отсутствует	значительно

Примечание – Дефекты характеризовались критериями: более значительно / значительно / не значительно.

Как видно из рис. 1, наиболее оптимальной смесью для экструзии из рассматриваемых на исследуемом 3D-принтере является смесь состава №3, при этом ее применение не исключает образование дефектов 3D-печати. Выявленные дефекты напечатанного на 3D-принтере изделия из сырьевой смеси состава №3 приведены на рис. 2.



а) повышенная пористость

б) повсеместные наплывы



в) отклонение высоты слоев изделия от проектного значения



г) отклонение длины и ширины изделия от проектного значения, наплыв в стартовой точке



д) раковины на локальных участках



е) усадочные трещины на локальных участках

Рис. 2. Дефекты напечатанного на 3D-принтере изделия (иллюстрация авторов)

Как видно из таблицы 1, рис. 1, 2, подвижность и предельное напряжение сдвига смеси оказывает значительное влияние на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере. В наибольшей степени образованию дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва подвержена смесь с чрезмерной подвижностью и наименьшим предельным напряжением сдвига, при этом дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют. Смесь состава №2 с недостаточной подвижностью и большим предельным напряжением сдвига по сравнению с составом №2 характеризуется наличием дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности, при этом отсутствием расплыва. Смесь состава №3 с подвижностью и предельным напряжением сдвига, близкими к оптимальным значениям, в наименьшей степени подвержена образованию рассматриваемых видов дефектов.

На втором этапе исследовано влияние особенностей моделирования цифровой модели изделия на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере.

Установлено, что образование дефектов в виде отклонений геометрических параметров напечатанного изделия связаны не только с величиной подвижности бетонной смеси, а также с некоторыми особенностями генерации G-code трехмерной цифровой модели образца и процесса ее 3D-печати (рис. 3, формула 1): 1) проектная (задаваемая) длина образца ($L_{пр}$) – расстояние между точками центра тяжести выдавливаемой сырьевой

смеси в начальном и конечном положениях сопла 3D-принтера во время печати; 2) фактическая длина образца – сумма проектной (задаваемой) длины образца ($L_{пр}$), длин ($L_{р.см.}$), вызванных растеканием сырьевой смеси, а также расстояний от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани ($a/2$) в начальном и конечном положениях сопла. При этом с увеличением подвижности длина ($L_{р.см.}$), вызванная растеканием сырьевой смеси, увеличивается.

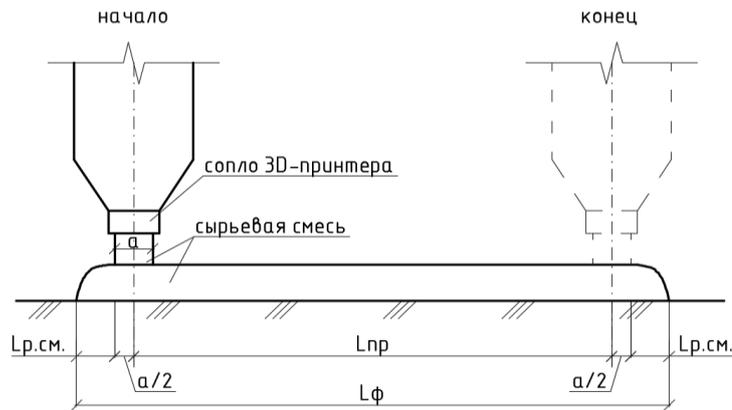


Рис. 3. Схема к определению фактической длины образцов, напечатанных на 3D-принтере [25]

$$L_{пр} = L_{ф} - \left(\frac{a}{2} \cdot 2 + L_{р.см.} \cdot 2 \right) \quad (1)$$

Отклонение длины (Δl) напечатанного изделия в таком случае примет следующий вид:

$$\Delta l = \frac{a}{2} \cdot 2 + L_{р.см.} \cdot 2 \quad (2)$$

На практике первое слагаемое формулы 2 возможно регулировать при создании управляющей программы печатаемого объекта (т.е. корректировкой G-code цифровой модели), поэтому им можно пренебречь. Тогда формула 2 будет описываться следующей функцией (3):

$$\Delta l = f(L_{р.см.}) \quad (3)$$

Для определения уравнения выявленной функции 3 исследовано влияние предельного напряжения сдвига растворной смеси на отклонение длины напечатанного изделия. G-code образца представлял собой полосу длиной 400 мм, количество печатаемых слоев – 4. В качестве переменного фактора X принято значение предельного напряжения сдвига смеси, в качестве функции отклика Y – отклонение длины напечатанного изделия. Результаты исследования приведены на рис. 4.

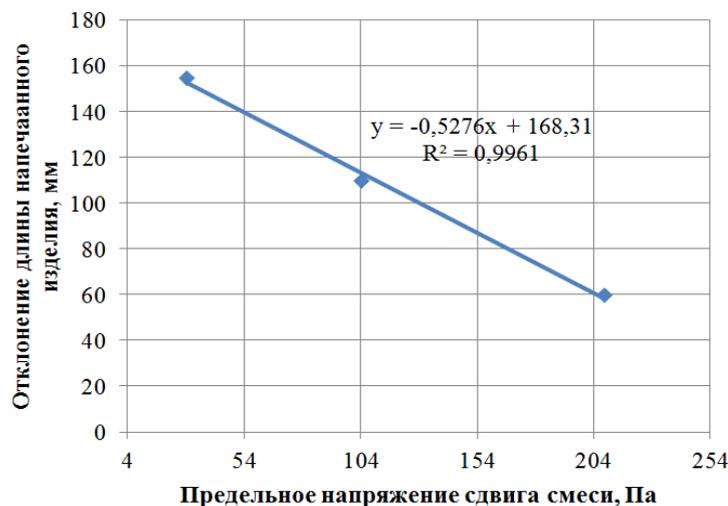


Рис. 4. Зависимость отклонения длины напечатанного изделия от предельного напряжения сдвига смеси (иллюстрация авторов)

Как видно из рис. 4, кривая зависимости отклонения длины напечатанного изделия от предельного напряжения сдвига смеси для образца, представляющего собой полосу в 4 слоя, имеет линейный характер и описывается следующим уравнением (4):

$$\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31 \quad (4)$$

Отклонение длины напечатанного образца тем выше, чем ниже предельное напряжение сдвига смеси. Полученное уравнение позволит прогнозировать отклонение длины напечатанного изделия в зависимости от подвижности смеси, предельного напряжения сдвига и получать изделия на 3D-принтере с длиной, соответствующей проектной.

На третьем этапе на основе анализа имеющихся данных систематизированы состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при входном, операционном и приемочном контроле.

Входной контроль предусматривает контроль применяемых строительных материалов, изделий, конструкций, полуфабрикатов и оборудования путем их проверки соответствия показателей качества материалов, изделий и оборудования требованиям нормативной документации, указанных в проектной документации и (или) договоре подряда, а также на наличие сопроводительных документов, подтверждающих данное качество. Входной контроль производится застройщиком и лицом, осуществляющим строительство.

Результаты входного контроля должны быть документированы в журналах входного контроля и лабораторных испытаний.

Готовность и исправность управляющей программы печатаемого объекта проверяется на ее бесперебойное воспроизведение 3D-принтером, исключая при этом возникновение ошибок, приводящих к сбою во время 3D-печати.

При необходимости в процессе 3D-печати могут применяться поддерживающие структуры в виде подложки из ламинированной фанеры, временные связевые элементы и др. Рабочие поверхности данных структур не должны иметь сколов, раковин, пустот и др. дефектов, перед применением их следует очистить от грязи, пыли. При этом они должны быть запроектированы таким образом, чтобы по завершению 3D-печати обеспечить их извлечение без повреждения напечатанного изделия, то есть поверхности поддерживающих структур, соприкасающиеся с бетоном, должны обладать минимальной адгезией к напечатанному бетону.

Кроме того, контролю подлежит выноска отметки стартовой точки экструзии на поверхности основания, поддерживающей структуры (при ее наличии) для обеспечения 3D-печати объекта в пределах рабочей зоны 3D-принтера.

Состав операций и средства контроля при создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении входного контроля качества приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении входного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Подготовительные работы	Проверить: – готовность и исправность управляющей программы печатаемого объекта; – наличие документов о качестве на компоненты сырьевой смеси (готовые сухие смеси), поддерживающую структуру (при ее наличии);	Визуальный То же	Паспорта (сертификаты), общий журнал работ
	– качество подготовки основания; – подготовленность всех механизмов и приспособлений, обеспечивающих производство работ с использованием строительного 3D-принтера – выноска отметки стартовой точки экструзии на поверхности основания, поддерживающей структуры (при ее наличии)	Визуальный, измерительный Визуальный Визуальный, измерительный	
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая			

Операционный контроль. Операционный контроль качества осуществляется застройщиком (техническим заказчиком) и лицом, осуществляющим строительство.

Технологический процесс следует организовывать исходя из технических возможностей и характеристик применяемого оборудования (установки АП), режимов 3D-печати, продолжительности технологических операций и перерывов при 3D-печати изделия – исходя из технологических и реологических показателей применяемой бетонной смеси.

Состав операций и средства контроля при создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении операционного контроля качества приведены в таблице 2.

Приемочный контроль. При приемочном контроле возведения строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) необходимо производить проверку качества выполненных строительно-монтажных работ, а также скрытых работ и отдельных конструктивных элементов с составлением актов освидетельствования скрытых работ и акта промежуточной приемки ответственных конструкций.

Технические критерии оценки приемочного контроля качества возведенной строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении приемочного контроля качества приведены в таблице 3.

Таблица 2

Состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении операционного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Приготовление бетонной смеси, экструзия (3D-печать), твердение бетона	Контролировать: – точность дозирования компонентов бетонной смеси; – свойства приготовленной бетонной смеси (подвижность, предельное напряжение сдвига, сохраняемость свойств и т.д.); – заданные режимы экструзии (скорость экструзии, скорость движения печатающей головки 3D-принтера); – длина, высота и ширина печатаемых слоев; – температурно-влажностный режим твердения бетона согласно требованиям ППР	Лабораторный То же Технический осмотр Визуальный, измерительный Измерительный	Общий журнал работ, журнал бетонных работ
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая, нивелир, уровень лазерный, пенетрометр карманный			
Операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), инженер лабораторного поста, геодезист			

Таблица 3

Состав операций и средства контроля строительной продукции, возведенной методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении приемочного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Приемка выполненных работ	Проверить: – соответствие геометрических параметров проектным; – качество поверхности бетона, в т.ч. и после ее постобработки; – фактическая прочность бетона; – соответствие проектному положению возведенных конструкций (отклонение от соосности вертикальных конструкций, отклонения от прямолинейности и плоскостности)	Визуальный, измерительный То же Лабораторный Визуальный, измерительный	Общий журнал работ, геодезическая исполнительная схема
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая, нивелир, уровень лазерный			
Приемочный контроль осуществляют: мастер (прораб), инженер лабораторного поста, геодезист в процессе работ, представители технического надзора заказчика			

4. Заключение

1. Установлено влияние подвижности сырьевой смеси на качество строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии (3D-печати). Для малоподвижных смесей характерно преимущественно образование дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности, отсутствия расплыва. Более подвижные смеси отличаются большей степенью образования дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва, однако дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют.
2. Установлено, что для получения изделий с требуемыми геометрическими размерами необходимо учитывать особенности при формировании G-code трехмерной цифровой модели и растекание смеси в процессе экструзии. Установлено, что фактическая длина печатаемого на 3D-принтере изделия складывается из 1) проектной (задаваемой) длины образца ($L_{пр}$) – расстояние между точками центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси в начальном и конечном положениях сопла 3D-принтера; 2) расстояний от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани ($a/2$) в начальном и конечном положениях сопла; 3) длин ($L_{р.см.}$), вызванных растеканием сырьевой смеси. В некоторой степени эти особенности можно компенсировать при помощи регулирования технологических параметров 3D-печати (диаметр сопла, скорость вращения шпинделя, скорость подачи и др.).
3. Определена зависимость геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати, выражающаяся линейной функцией. Снижение предельного напряжения сдвига с 208 до 29 Па приводит к снижению геометрических отклонений длины напечатанных образцов на 23,75%.
4. Разработаны основные положения организации и осуществления контроля качества при возведении строительной продукции методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ООО «3D-Строй» (Россия, г. Казань), стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1051.2021.1).

Список литературы

1. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Низамов Р. К. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. №1(601). С. 15–28.
2. Строганов В. Ф., Амельченко М. О., Мухаметрахимов Р. Х., Вдовин Е. А., Табаева Р. К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем - шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32.
3. Чернышева, Н.В., Лесовик, В.С., Володченко, А.А., Глаголев, Е.С., Дребезгова М. Ю. Композиционные материалы с использованием энергосберегающего техногенного сырья для 3D аддитивных технологий // Сборник «Наукоемкие технологии и инновации» сборник докладов международной научно-практической конференции. 2016. С. 452–456.
4. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения».
5. Горбач П.С., Шустов П.А., Левчук С. С. Аддитивные методы производства в строительной отрасли // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. №10. С. 174–177.

6. Золотарева С. В. Развитие и применение 3D технологий в строительстве // Сборник трудов VII Международного молодежного форума «Образование, наука, производство». 2016. С. 1033–1037.
7. Гуторов Н.Ю., Чепенко А.С., Науменко Н.А., Павленко О. А. Аддитивные технологии и современные технологии строительства // Сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 т. 2017. С. 85–87.
8. Матюхина А.А., Никифорова Н.А., Никулина А.С., Дементьева Ю.А., Лесниченко Е. Н. Преимущества аддитивных технологий и пути совершенствования 3D строительства // Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 2185–2189.
9. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С. В. Технология 3D-печати с использованием метода послойного экструдирования в строительстве // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 2. С. 251–261.
10. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // Autom. Constr. Elsevier, 2017. Vol. 83. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
11. Nematollahi B., Xia M., Sanjayan J. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies // 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), At Taipei, Taiwan. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0035.
12. Kruger P. J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Stellenbosch University, 2019. № December. DOI: 10.13140/RG.2.2.16259.04649.
13. Verian K. P., Ashcroft J., Carli M. D., Bright R. P., Maandi E., Avakian A., Baaklini E. Improving the Bonding Adhesion of the Cold Joints of Normal and Lightweight 3D Printing Mortars // RILEM Bookseries. 2020. Vol. 28. 527–536 p. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_54.
14. Tay Y. W. D., Qian Y., Tan M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // Compos. Part B Eng. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 174. № February. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.
15. Иноземцев А. С., Королев Е. В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. №7(118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
16. Королев Е. В., Зыонг Т. К., Иноземцев А. С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2020. №6(15) 6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
17. Зыонг, Т.К. Высокопрочные легкие фибробетоны конструкционного назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зыонг Тхань Куй. – М., 2020. – 201 с.
18. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Глаголев Е.С., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Кучерова А.С. Канева Е. В. Современные трехмерные технологии и факторы, сдерживающие их // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №1(12). С. 22–30. DOI: 10.12737/23011.
19. Полуэктова В.А. Закономерности поверхностных явлений и модифицирования полимерминеральных дисперсий для аддитивных технологий: дис. ... д-ра техн. наук: 1.4.10 / Полуэктова Валентина Анатольевна. – Белгород, 2022. - 517 с.
20. Новосадов Н.И., Полуэктова В. А. Прочностные характеристики полимерцементного композита для аддитивных технологий // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 133–137.
21. Slavcheva, G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation // Инженерно-строительный журнал. 2018. Vol. 8. № 84. P. 97–108. DOI: 10.18720/MSE.84.10.
22. Славчева Г. С., Бритвина Е. А., Ибряева А.И. Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. №4(41). С. 134–143. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-14.
23. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления на основе возможностей арсенала «Нано» // Нанотехнологии в строительстве научный интернет-журнал. 2018. №3(10). С. 107–122. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122.

24. Мухаметрахимов Р. Х., Горбунова П. С. Роль дисперсного армирования в формировании технологических свойств и реологических свойств бетонных смесей для строительной 3D-печати // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. 2019. С. 270–274.
25. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // *Constr. Unique Build. Struct.* 2021. Vol. 94. № 1. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4.
26. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // *Mag. Civ. Eng.* 2021. Vol. 102. № 2. DOI: 10.34910/MCE.102.6.
27. ГОСТ Р 57590-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 3. Общие требования».
28. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // *Lect. Notes Civ. Eng.* 2021. Vol. 169. P. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_1.
29. Jianchao Z., Zhang T., Faried M., Wengang C. 3D printing cement based ink, and it's application within the construction industry // *ASCMCES-17. MATEC Web of Conferences*, 2017. P. 02003.
30. Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar // *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12. № 10. DOI: 10.3390/ma12101708.
31. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 890. P. 012082. DOI: 10.1088/1757-899x/890/1/012082.
32. Slavcheva G. S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 481. № 1. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012043.
33. Королев Е. В., Зыонг Т. К., Иноземцев А. С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // *Вестник МГСУ*. 2020. №6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
34. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Shorstova E. S. Fiber concrete for 3-D additive technologies // *Mater. Sci. Forum*. 2019. № 974. P. 367–372.
35. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение. Москва: Высшая школа, 2004. 701 с.
36. Теличенко В.И. Технология строительных процессов: В 2 ч. Ч. 1.: Учебник / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008. - 392 с.
37. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cem. Concr. Res.* 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
38. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification // *Mater. Des.* 2019. № 169. P. 107684. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107684.
39. Le T.T., Austin S.A. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // *Cem. Concr. Res.* 2012. Vol. 42. № 3. P. 558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
40. ГОСТ Р 57587-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний».
41. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 368 с.

References

1. Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Nizamov R. K. Carbonate cements of low water demand as promising binders for concrete // *Concrete and reinforced concrete*. 2020. №1(604). P. 15–28.
2. Stroganov V. F., Amelchenko M. O., Mukhametrahimov R. Kh., Vdovin E. A., Tabaeva R. K. Increasing the level of adhesion of styrene-acrylic coatings modified with shungite filler in the protection of building materials. *Adhesives. . Sealants. Technology*. 2021. №9. P. 29–32.
3. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Glagolev E.S., Drebezhgova M. Yu. Composite materials using energy-saving technogenic raw materials for 3D additive technologies // *Collection “Science-intensive technologies and innovations” collection of reports of the international scientific-practical conference*. 2016. P. 452–456.
4. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 “Additive manufacturing processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions.
5. Gorbach P.S., Shustov P.A., Levchuk S.S. Additive production methods in the construction industry // *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2016. No. 10. P. 174–177.
6. Zolotareva S. V. Development and application of 3D technologies in construction // *Proceedings of the VII International Youth Forum "Education, Science, Production"*. 2016. P. 1033–1037.
7. Gutorov N.Yu., Chepenko A.S., Naumenko N.A., Pavlenko O.A. Additive technologies and modern construction technologies // *Collection of reports of the X International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists : in 4 volumes*. 2017. P. 85–87.
8. Matyukhina A.A., Nikiforova N.A., Nikulina A.S., Dementieva Y.A., Lesnichenko E.N. Advantages of additive technologies and ways to improve 3D construction. technical conference of young scientists of BSTU. 2017. P. 2185–2189.
9. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. 3D printing technology using layer-by-layer extrusion in construction // *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2017. №2. P. 251–261.
10. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // *Autom. Constr. Elsevier*, 2017. Vol. 83. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
11. Nematollahi B., Xia M., Sanjayan J. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies // *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017)*, At Taipei, Taiwan. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0035.
12. Kruger P. J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Stellenbosch University, 2019. № December. DOI: 10.13140/RG.2.2.16259.04649.
13. Verian K. P., Ashcroft J., Carli M. D., Bright R. P., Maandi E., Avakian A., Baaklini E. Improving the Bonding Adhesion of the Cold Joints of Normal and Lightweight 3D Printing Mortars // *RILEM Bookseries*. 2020. Vol. 28. 527–536 p. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_54.
14. Tay Y. W. D., Qian Y., Tan M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // *Compos. Part B Eng. Elsevier Ltd*, 2019. Vol. 174. № February. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.
15. Inozemtsev A. S., Korolev E. V., Zuong T. K.. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU*. 2018. №7(118). P. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
16. Korolev E. V., Zuong T. K., Inozemtsev A. S. A method for providing internal care for cement hydration in 3D printing formulations. *Vestnik MGSU*. 2020. № 6(15) 6. P. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
17. Zuong T.K. High-strength lightweight fiber-reinforced concrete for structural purposes: Thesis / Zuong Thanh Kui. - M., 2020. - 201 p.
18. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.K., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezhgova M.Y., Kucherova A.S. Kaneva E. V. Modern three-dimensional technologies and factors restraining them. // *Bulletin of BSTU*. 2016. №1(12). P. 22–30. DOI: 10.12737/23011.
19. Poluektova V.A. Patterns of surface phenomena and modification of polymer-mineral dispersions for additive technologies: Thesis / Poluektova Valentina Anatolyevna. - Belgorod, 2022. - 517 p.

20. Novosadov N.I., Poluektova V.A. Strength characteristics of a polymer-cement composite for additive technologies // Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference. 2017. P. 133–137.
21. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation // Magazine of Civil Engineering. 2018. №8(84). P. 97–108. DOI: 10.18720/MCE.84.10.
22. Slavcheva G. S., Britvina E. A., Ibryaeva A.I. Construction 3D printing: an operational method for monitoring the rheological characteristics of mixtures // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2019. №4 (41). C. 134–143. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-14.
23. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of dispersed systems for building 3D printing: a control problem based on the capabilities of the Nano arsenal // Nanotechnologies in construction scientific Internet journal. 2018. No. 3(10). P. 107–122. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122.
24. Mukhametrahimov R. K., Gorbunova P. S. The role of dispersed reinforcement in the formation of technological properties and rheological properties of concrete mixtures for building 3D printing // Actual problems and prospects for the development of the construction complex. 2019. P. 270–274.
25. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // Constr. Unique Build. Struct. 2021. Vol. 94. № 1. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4.
26. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Mag. Civ. Eng. 2021. Vol. 102. № 2. DOI: 10.34910/MCE.102.6.
27. GOST R 57590-2017 “Additive technological processes. Basic principles - part 3. General requirements.
28. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // Lect. Notes Civ. Eng. 2021. Vol. 169. P. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_1.
29. Jianchao Z., Zhang T., Faried M., Wengang C. 3D printing cement based ink, and it’s application within the construction industry // ASCMCES-17. MATEC Web of Conferences, 2017. P. 02003.
30. Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar // Materials (Basel). 2019. Vol. 12. № 10. DOI: 10.3390/ma12101708.
31. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. P. 012082. DOI: 10.1088/1757-899x/890/1/012082.
32. Slavcheva G. S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 481. № 1. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012043.
33. Korolev E. V., Zuong T. K., Inozemtsev A. S. A method for providing internal care for cement hydration in 3D printing formulations. Vestnik MGSU. 2020. №6. P. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
34. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Shorstova E. S. Fiber concrete for 3-D additive technologies // Mater. Sci. Forum. 2019. № 974. P. 367–372.
35. Rybiev I. A. Building materials science. Moscow: Higher School, 2004. 701 p.
36. Telichenko V.I. Technology of building processes: In 2 hours. Part 1: Textbook / V.I. Telichenko, O.M. Terentiev, A.A. Lapidus - 4th ed., Sr. - M.: Higher. School, 2008. - 392 p.
37. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cem. Concr. Res. 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
38. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification // Mater. Des. 2019. № 169. P. 107684. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107684.
39. Le T.T., Austin S.A. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cem. Concr. Res. 2012. Vol. 42. № 3. P. 558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
40. GOST R 57587-2017 “Products obtained by the method of additive technological processes. Methods of control and testing”.

41. Bazhenov Y.M. Modified high-quality concretes / Y.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. - М.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2006. - 368p.

Информация об авторах.

Мухаметрахимов Р.Х., кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Зиганшина Л.В., аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: lilya0503199@gmail.com

Information about the authors

Mukhametrakhimov R. Kh., candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Ziganshina L.V., postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: lilya0503199@gmail.com.