

УДК: 69.05, 691.3
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13
EDN: ULXEQB



Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати

Р.Х. Мухаметрахимов¹, А.Р. Галаутдинов¹, Л.В. Зиганшина¹

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

Аннотация. *Постановка задачи.* Существенным недостатком технологии аддитивного строительного производства методом послойной экструзии является возможность образования «холодных» швов между слоями при значительных временных интервалах в процессе печати, что приводит к существенному снижению прочности и долговечности готовых изделий. Цель исследований – разработать технологическое решение по совершенствованию аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати. Задачи – исследование влияния полифункциональной добавки для переходного слоя в технологии 3D-печати на требуемую продолжительность технологического перерыва; выявление зависимости прочности сцепления слоев мелкозернистого бетона основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки.

Результаты. Установлено, что устройство переходного слоя из модифицированной бетонной смеси при незначительном снижении прочности сцепления слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч. Разработано технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками мелкозернистых бетонных смесей, уложенных до технологического перерыва, которое позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании технологии аддитивного строительного производства, позволяющего осуществлять строительную 3D-печать методом послойной экструзии с технологическими перерывами без ущерба для качества получаемой строительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, технологический перерыв, холодный шов, адгезия, бетон, качество

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 127-134, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13, EDN: ULXEQB

Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing

R.Kh. Mukhametrakhimov¹, A.R. Galautdinov¹, L.V. Ziganshina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* A significant disadvantage of additive manufacturing for construction is the possibility of the formation of “cold” joint between layers at significant time intervals during the printing process, which leads to a significant decrease in the strength and durability of finished products. The goal of the research is to develop a technological solution to improve additive construction production by increasing the adhesion of layers during long breaks in the 3D concrete printing. The objectives are to study the influence of a multifunctional additive for the transition layer in 3D printing technology on the required duration of a technological break and to identify the dependence of the adhesion strength of layers of fine-grained concrete of the basic composition with the transition layer on the duration of hardening of the samples and the type of multifunctional complex additive.

Results. It has been established that the installation of a transition layer from a modified concrete mixture with a slight decrease in the adhesion strength of the layers (1.5-9%) allows for long technological breaks in the range of 3-12 hours. A technological solution has been developed in additive construction production using the layer-by-layer extrusion method, based on the device transition layer of fine-grained concrete mixtures modified with multifunctional complex additives, laid before a technological break, which allows you to specifically regulate its duration in a wide time interval (3-12 hours) while ensuring high quality of finished construction products.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the improvement of additive manufacturing for construction, which makes it possible to carry out construction 3D concrete printing with technological breaks without compromising the quality of the resulting construction products.

Keywords: additive manufacturing for construction, 3D concrete printing, technological break, cold joint, adhesion, concrete, quality

For citation: Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 127-134, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13, EDN: ULXEQB

1. Введение

Технологии 3D-печати в настоящее время развиваются весьма интенсивно, что обуславливает их активное внедрение во многие сферы научной деятельности, а также промышленного и строительного производства. Одним из видов аддитивных технологий, применяемых в строительстве, является 3D-печать методом послойной экструзии растворных и бетонных смесей. Данная технология является разновидностью метода возведения зданий наращиванием, позволяет создавать (выращивать) объекты путем послойного нанесения сырьевых смесей в соответствии с заданной трехмерной цифровой моделью и обладает рядом преимуществ перед традиционно применяемыми строительными процессами (снижение трудоемкости и сроков строительства; повышение уровня безопасности работ; обеспечение возможности создания геометрически сложных элементов и др.) [1,2]. Однако особенности данной технологии, а именно поочередная укладка слоев, обуславливают наличие существенного недостатка, заключающегося в образовании «холодных» швов между слоями при значительных временных интервалах в процессе печати, что приводит к существенному снижению прочности и долговечности готовых изделий. При этом при осуществлении работ в построечных или заводских условиях менее чем в три смены технологические перерывы в 3D-печати составят не

менее 10-12 часов, в этой связи обеспечение возможности осуществления продолжительных технологических перерывов является актуальной практической задачей, решение которой позволит обеспечить «гибкость» производственного процесса.

Анализ имеющихся научных и практических исследований в рассматриваемой области позволил выявить ряд работ, направленных на разработку технологических решений по повышению уровня сцепления слоев в технологии 3D-печати. Так в [3,4] изучено применение анкерных элементов, укладываемых в печатаемый слой при осуществлении перерывов в процессе послойной экструзии, которые выполняют армирующую функцию. В работах [5,6] разработаны составы композитов на полимерной основе в качестве альтернативы цементным композициям для 3D-печати. Для увеличения адгезии слоев авторами применялись специальные волокна, пропитанные органическим связующим, которое послойно укладывается по экструдированному слою. Недостатками данных способов является существенное возрастание трудоёмкости и стоимости 3D-печати.

По нашему мнению, наиболее рациональным направлением решения задачи повышения адгезии слоев [7] при продолжительных технологических перерывах является регулирование рецептурных [8] и технологических факторов аддитивного производства. Так в работе [9] показана эффективность применения в цементных смесях для 3D-печати известкового наполнителя и метакаолина по критерию повышения величины адгезии слоев. Вместе с тем известковый наполнитель и метакаолин, обладая высокими значениями удельной поверхности, приводят к существенному возрастанию количества воды затворения, требуемого для приготовления смесей для 3D-печати, и, как следствие, к повышению пористости и снижению показателей водостойкости композитов.

В исследованиях [10–12] показано влияние полимерного порошка на адгезионные характеристики бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати. Показано, что модифицирование сырьевых смесей данным компонентом позволяет повысить величину адгезии напечатанных слоев за счет образования полимерной пленки на границе контакта слоев. Аналогичный эффект получен авторами в работе [13], в которой показана эффективность модифицирования мелкозернистых бетонных смесей и бетонов на основе угольной золы для 3D-печати полимерными добавками. Однако можно ожидать, что применение полимерных добавок, описанных в работах [10–13], приведет к образованию инертной полимерной пленки на поверхности нижележащего слоя при осуществлении длительного технологического перерыва и к соответствующему снижению адгезионного взаимодействия с вышележащим слоем, печатаемым после перерыва. Рассматривая роль рецептурных и технологических факторов в формировании адгезии слоев следует отметить наличие исследований, в которых изучено влияние подвижности бетонных смесей для 3D-печати на величину сцепления слоев, выявлены зависимости величин сцепления слоев от технологических факторов (продолжительности перерывов в процессе печати)¹.

Таким образом, анализ научного и практического опыта аддитивного строительного производства позволил выявить проблему снижения сцепления слоев при длительных технологических перерывах. В этой связи задача совершенствования аддитивного строительного производства за счет обеспечения повышенной адгезии печатаемых слоев мелкозернистых бетонных смесей при необходимости осуществления технологических перерывов является весьма актуальной.

Техническим результатом разрабатываемого в настоящей работе решения является возможность осуществления технологических перерывов продолжительностью до 12 ч без образования в конструкции холодных швов и существенного снижения величины адгезии печатаемых слоев, уложенных непосредственно до и после технологического

¹ Зиганшина, Л. В. Мелкозернистые бетоны в технологии аддитивного производства (3D-печати) : специальность 2.1.5 Строительные материалы и изделия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зиганшина Лилия Валиевна. – Казань, 2022 [Ziganshina, L. V. Fine-grained concrete in 3D concrete printing : specialty 2.1.5 Construction materials and products : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Ziganshina Liliya Valievna. – Kazan, 2022].

перерыва, за счет устройства переходного слоя из модифицированных мелкозернистых бетонных смесей [14–16].

Цель работы – разработать технологическое решение по совершенствованию аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати.

Задачи:

1. Исследование влияния полифункциональной добавки для переходного слоя в технологии 3D-печати на требуемую продолжительность технологического перерыва.

2. Выявление зависимости прочности сцепления слоев мелкозернистого бетона основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки.

Объект исследований – мелкозернистые бетонные смеси и бетоны, напечатанные на строительном 3D-принтере, технологические параметры аддитивного процесса.

Предмет исследований – величина адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати, технологическая схема производства работ.

2. Материалы и методы

В качестве исходных материалов для приготовления бетонной смеси для 3D-печати применялись следующие компоненты по ГОСТ 59097-2020:

1. Портландцемент (ПЦ): ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020;

2. Заполнитель: кварцевый песок с модулем крупности M_k 3 по ГОСТ 8736-2014;

3. Активные минеральные добавки:

– метакраолин месторождения «Журавлиный лог». Минералогический состав: аморфизованный каолинит (90-93%), реликтовая слюда (2,5-3%) и кварц (4-5%);

– порошок диатомитовый производства ООО «Диамикс», СТО 23998461-020-2018. Насыпная плотность 300 кг/м³; рН водной вытяжки 7,1; потери при прокаливании 8,4%.

4. Гидрофобизирующая добавка (ГД) «ГКЖ-11Н» на основе натрий метилсилантриола. ПАО «Химпром», коричневая жидкость, плотность (20°C) – 1,3 г/см³.

5. Пластифицирующая добавка (ПД) «Master Rheobuild 183» на основе нафталинсульфонат натрия. ООО «BASF Строительные системы», жидкость коричневого цвета, плотность (20°C) – 1,12 г/см³, рН (20°C) – 5.

6. Водопроводная питьевая вода по ГОСТ 23732-2011.

Сроки схватывания смесей определяли по ГОСТ 23789-2018, подвижность смесей – по ГОСТ 5802-86. Прочность сцепления (адгезию) напечатанных слоев определяли на 28 сутки при помощи измерителя адгезии «ПСО-10МГ4С» методом нормального отрыва стальных дисков (пластин) в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018. Образцы для испытаний представляли собой полосы длиной 50-70 мм шириной 30-40 мм, напечатанные в два слоя. Для приклеивания стальных дисков (пластин) к образцам использовали эпоксидную смолу ЭД-20 по ГОСТ 10587-84 с отвердителем ТЭТА по ТУ 6-02-1099-83.

Формование образцов осуществлялось на цеховом строительном 3D-принтере «АМТ S-6044», ООО «СПЕЦАВИА» посредством трехмерной печати по цифровой модели (G-code). Устройство переходного слоя производится следующим образом: после печати последнего слоя из смеси основного состава перед планируемым технологическим перерывом бункер 3D-принтера промывается. Одновременно с этим производится приготовление требуемого количества мелкозернистой бетонной смеси переходного слоя, последующая ее загрузка в промытый бункер и непосредственно печать.

3. Результаты и обсуждение

Исследования выполнены с использованием мелкозернистых бетонных смесей с соотношением Ц/П = 1/3, марки по подвижности Пк-3. Смеси основного состава мелкозернистого бетона модифицировали разработанной на предыдущих этапах исследований полифункциональной комплексной добавкой, включающей бинарную смесь метакраолина и диатомита; ПД «MasterRheobuild 183»; ГД «ГКЖ-11Н» [17]. Состав смесей переходного слоя модифицировали полифункциональными комплексными добавками КД1 – КД4, которые повышенное количество ГД «ГКЖ-11Н» (0,1-0,4% от

массы ПЦ соответственно). При этом целесообразность и рациональность применения конкретного вида разработанной полифункциональной добавки для переходного слоя (КД1 – КД4) в технологии 3D-печати обусловлена требуемой продолжительностью технологического перерыва (таблица 1).

Таблица 1
Вид применяемой полифункциональной добавки КД-П для переходного слоя в 3D-печати в зависимости от требуемой продолжительности технологического перерыва

№ добавки	Требуемая продолжительность технологического перерыва (не более), ч	Фактические сроки схватывания, мин	
		Начало	Конец
КД1	3 часа	393	541
КД2	6 часов	489	662
КД3	9 часов	674	850
КД4	12 часов	808	925

Зависимость прочности сцепления слоев МЗБ основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки приведена на рисунке 1.

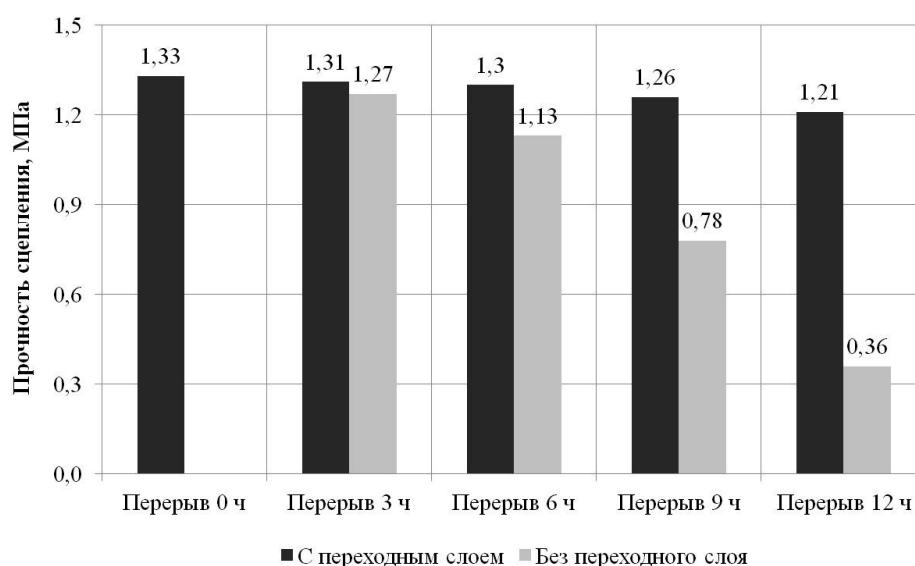


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления слоев МЗБ основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Dependence of the adhesion strength of fine-grained concrete layers of the basic composition with the transition layer on the duration of hardening of samples and the type of multifunctional complex additive (illustration by the authors)

Устройство переходного слоя из модифицированных мелкозернистых бетонных смесей (рисунок 1) позволяет обеспечить высокие показатели адгезии слоев при продолжительных технологических перерывах. Так при продолжительности перерывов 3 и 6 ч величина сцепления базового слоя с переходными слоями, модифицированными КД1 и КД2, практически не снижается и равна 1,31 МПа и 1,3 МПа соответственно, что составляет 98,5% и 97,7% когезионной прочности сцепления слоев МЗБ базового состава, напечатанного без перерывов. При этом вышеуказанные значения прочности сцепления на 3,2% и 15% соответственно выше, чем в образцах без переходного слоя.

В ранее выполненных исследованиях установлено, что снижение величины адгезии напечатанных слоев МЗБ основного состава составляет 41,3% и 72,9% при продолжительности технологических перерывов 9 ч и 12 ч соответственно, что приводит к образованию в конструкции холодных швов. Устройство переходного слоя из МЗБ, модифицированного КД3 и КД4, позволяет существенно увеличить адгезию слоев при аналогичных значениях перерывов. Так величина сцепления базового слоя с переходными слоями, модифицированными КД3-П и КД4-П, при продолжительности технологических перерывов 9 ч и 12 ч равна 1,26 МПа и 1,21 МПа (рисунок 1), что

составляет 94,7% и 91% соответственно когезионной прочности сцепления слоев МЗБ основного состава, напечатанного без перерывов.

Таким образом, установлено, что устройство модифицированного переходного слоя при незначительном снижении прочности адгезии слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч, что обеспечивает совершенствование аддитивного строительного производства. Полученные результаты согласуются с исследованиями [18, 19].

На основе выполненных исследований разработана принципиальная технологическая схема аддитивного строительного производства из модифицированного МЗБ с увеличенной продолжительностью технологического перерыва (рисунок 2).

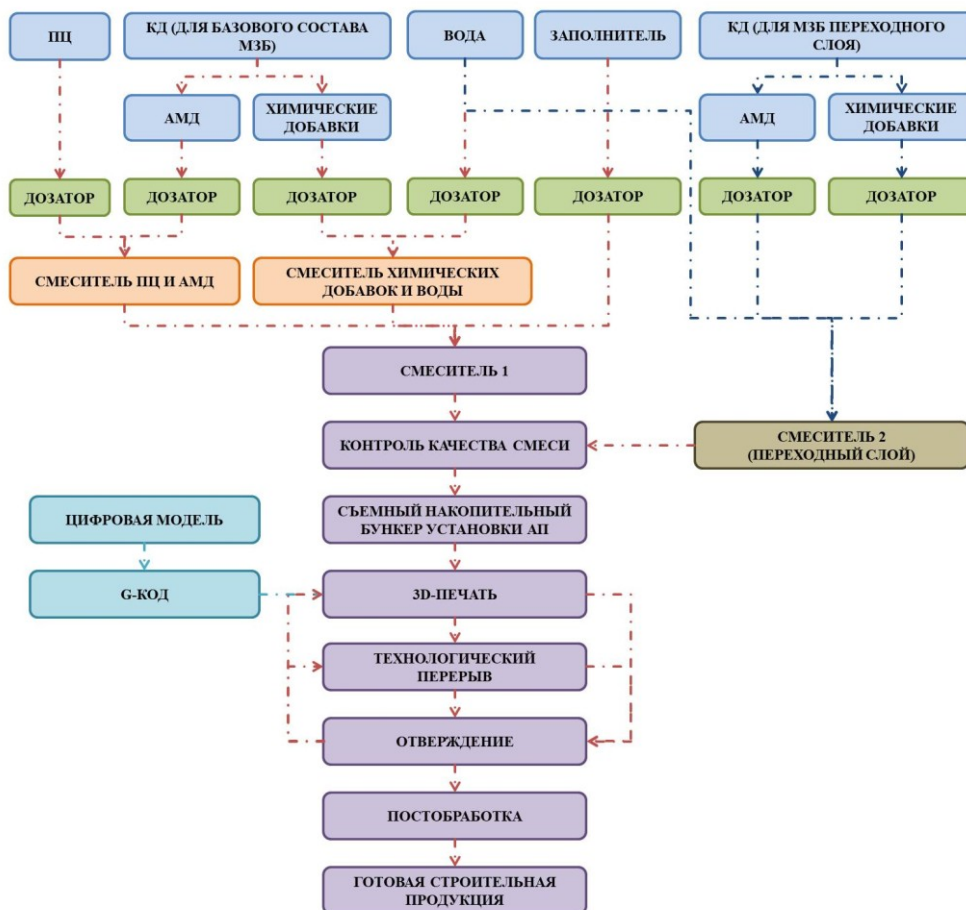


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема аддитивного производства строительной продукции из цементных МЗБ методом послойной экструзии с увеличенной продолжительностью технологического перерыва (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Principal technological diagram of the additive manufacturing for construction using fine-grained concrete by 3DCP with an increased duration of the technological break (illustration by the authors)

Разработанное технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, осуществляемое по разработанной принципиальной схеме (рисунок 2) и основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками МЗБС, уложенных до технологического перерыва, позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

4. Заключение

1. Выполнен анализ научных и практических исследований в области 3D-печати, направленных на разработку технологических решений по повышению уровня сцепления слоев в технологии 3D-печати, в том числе для длительных технологических

перерывах, на основе которого обоснована актуальность настоящих исследований, выявлены нерешенные задачи и определены рациональные направления их решения.

2. Установлено, что устройство переходного слоя из модифицированной бетонной смеси при незначительном снижении прочности сцепления слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч.

3. Разработано технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками МЗБС, уложенных до технологического перерыва, которое позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

Список литературы/ References

1. Иноземцев А. С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245 [Inozemcev A. S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction // Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19. Iss. 2. P. 216–245].
2. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные гипсоцементно-пуццолановые бетоны для 3D-печати // Строительные материалы. 2024. № 1–2. С. 79–89. [Muhametrahimov R.Kh., Rahimov R.Z., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified gypsum-cement-pozzolanic concretes for 3D printing // Construction Materials. 2024. Iss. 1–2. P. 79–89].
3. Строганов В. Ф., Амелъченко 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 [Stroganov V. F., Amel'chenko M. O., Muhametrahimov R. Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increasing the level of adhesion of styrene-acrylic coatings modified with shungite filler when protecting building materials // Adhesives. Sealing materials. Technologies. 2021. Iss. 9. P. 29–32].
4. Barbosa M.S., dos Anjos M.A.S., Cabral K.C., Dias L.S. Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 341. P. 127775.
5. Dubov A., Ruben S., Korshikov V., Ivanova A., Yakovlev E. 3D Printing of Polymers with Continuous Fibers to Replace Steel Reinforcement and Structural Steel in Construction // Progress in additive manufacturing 2020. ASTM International. 2022. P. 165–179.
6. Dvorkin L., Konkol J., Marchuk V., Huts A. Effectiveness of Polymer Additives in Concrete for 3D Concrete Printing Using Fly Ash // Polymers. 2022. Vol. 14. Iss. 24. P. 5467.
7. Hass L., Bos F. Bending and Pull-Out Tests on a Novel Screw Type Reinforcement for Extrusion-Based 3D Printed Concrete. 2020. P. 632–645.
8. Krčma M., Škaroupka D., Vosynek P., Zikmund T., Kaiser J., Palousek D. Use of polymer concrete for large-scale 3D printing // Rapid Prototyping Journal. 2021. Vol. 27. Iss. 3. P. 465–474.
9. Marchment T., Sanjayan J. Penetration Reinforcing Method for 3D Concrete Printing. 2020. P. 680–690.
10. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Iss. 6.
11. Tao Y., Lesage K., De Schutter G., Van Tittelboom K. Adhesion studies in view of automated repair using 3D concrete printing // MATEC Web of Conferences. 2023. Vol. 378. P. 03003.
12. Yaxin Tao, Qiang Ren, Gieljan Vantighem, Karel Lesage, Kim Van Tittelboom, Yong Yuan, Wouter De Corte, Geert De Schutter. Extending 3D concrete printing to hard

- rock tunnel linings: Adhesion of fresh cementitious materials for different surface inclinations // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 149. P. 104787.
13. Vdovin E. A., Stroganov V. F. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures // *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020. Vol. 786. Iss. 1. P. 012065.
 14. Пат. 2794037 Российская Федерация, МПК E04B 2/84, B28B 1/00, B33Y 10/00. Способ 3D-печати бетоном с длительным технологическим перерывом / Мухаметрахимов Р. Х., Зиганшина Л. В. – заявл. 01.11.2022 : опубл. 11.04.2023 [Mukhametrahimov R. Kh., Ziganshina L. V. A method for 3D printing concrete with a long technological break. Patent RF. No. 2794037; 11.04.2023].
 15. Пат. 2795274 Российская Федерация, МПК E04G 21/02, E04B 2/84, B33Y 10/00, C04B 28/04, C04B 111/20. Способ 3D-печати модифицированной бетонной смесью / Мухаметрахимов Р.Х. – заявл. 01.11.2022 : опубл. 02.05.2023 [Mukhametrahimov R. Kh. Method of 3D printing with modified concrete mixture. Patent RF. No. 2795274; 02.05.2023].
 16. Пат. 2793497 Российская Федерация, МПК E04B 2/84, B28B 1/00, B33Y 10/00, C04B 28/04. Способ аддитивного производства в строительстве с длительным технологическим перерывом / Мухаметрахимов Р.Х.– заявл. 01.11.2022 : опубл. 04.04.2023 [Mukhametrahimov R. Kh. Additive manufacturing method in construction with a long technological break. Patent RF. No. 2793497; 04.04.2023].
 17. Пат. 2775131 Российская Федерация, МПК C04B 28/04. Бетонная смесь на основе цемента для строительной 3D-печати // Мухаметрахимов Р. Х., Зиганшина Л. В. – заявл. 30.12.2021 : опубл. 28.06.2022 [Mukhametrahimov R. Kh., Ziganshina L. V. Cement-based concrete mixture for construction 3D printing. Patent RF. No. 2775131; 28.06.2022].
 18. Wang Y., Qiu L. chao, Chen S. gui, Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 411. P. 134403
 19. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 143. P. 106386.

Информация об авторах

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

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Галаутдинов Альберт Радикович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Зиганшина Лилия Валиевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: lilya0503199@gmail.com

Information about the authors

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

Email: muhametrahimov@mail.ru

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

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Liliya V. Ziganshina, candidate of technical sciences, senior researcher, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: lilya0503199@gmail.com