



УДК: 69.05, 691.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11

EDN: OJRGGGB

## Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства

Р.Х. Мухаметрахимов<sup>1</sup>, Л.В. Зиганшина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Необходимость повышения эффективности контроля качества сырьевых смесей и печатаемых изделий на их основе, устранения выявленных недостатков с целью получения качественной строительной продукции невозможно без определения видов возникающих дефектов, повреждений и несоответствий бетонов в технологии аддитивного строительного производства, что обуславливает актуальность решаемой проблемы. Цель исследований – разработать классификацию дефектов бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати). Задачи исследований – осуществление контроля качества напечатанных на 3D-принтере образцов из бетонных и растворных смесей визуальным и измерительным методами, выявление дефектов, установление причин их возникновения, разработка определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства.

*Результаты.* Разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологиях аддитивного производства в строительстве, учитывающая их образование в процессе формования, твердения и эксплуатации. Полученные результаты рекомендованы для применения в документации всех видов научно-технической, учебной и справочной литературе в области аддитивного строительного производства.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в обеспечении единства терминологии дефектов бетонов и растворов, возникающих в технологии аддитивного строительного производства (3D-печати), возможности оперативно и объективно выявлять их дефекты при 3D-печати и принимать решение по их устранению (при необходимости), повышении качества строительной продукции.

**Ключевые слова:** аддитивное строительное производство, 3D-печать, бетоны, растворы, контроль качества, дефекты

**Для цитирования:** Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 107-116, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11, EDN: OJRGGGB

## Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP)

R.Kh. Mukhametrakhimov<sup>1</sup>, L.V. Ziganshina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The need to increase the efficiency of quality control of raw mixtures and printed products, to eliminate identified deficiencies in order to obtain high-quality construction products is impossible without identifying the types of defects that arise, damage and inconsistencies of concrete in 3D concrete printing (3DCP), which determines the relevance of the problem being solved. The purpose of the research is to develop a classification of defects

in concrete and mortars formed during 3DCP. The objectives of the research are to carry out quality control of 3D-printed samples from concrete and mortar mixtures using visual and measuring methods, identify defects, establish the causes of their occurrence, develop definitions and symbols of defects and concrete and mortars based on mineral binders in additive construction technology.

*Results.* The classification of defects, definitions and symbols of defects in concrete and mortars based on mineral binders in 3DCP has been developed, taking into account their formation during the process of molding, hardening and operation. The results obtained are recommended for use in documentation of all types of scientific, technical, educational and reference literature in the field of additive construction manufacturing.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is to ensure the unity of terminology for defects in concrete and mortars that arise in 3DCP, the ability to quickly and objectively identify their defects during 3D printing and make decisions to eliminate them (if necessary), improving the quality of construction products.

**Keywords:** additive construction manufacturing, 3D printing, concrete, mortars, quality control, defects

**For citation:** Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina, L.V. Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP) // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 107-116, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11, EDN: OJRGGGB

## 1. Введение

Применение технологии 3D-печати в строительной отрасли имеет огромный потенциал [1–3] в связи с автоматизацией процессов строительства, возможностью создания изделий и конструкций различной геометрической формы без использования опалубки [4], значительным сокращением сроков строительства и трудозатрат [5–7]. Данная технология успешно применяется при создании строительной продукции различного назначения [8] – от отдельных элементов зданий и сооружений до крупномасштабных комплексов зданий и сооружений [9–11].

При наличии большого числа преимуществ стоит отметить, что технология строительной 3D-печати – сложный метод, требующий сочетания знаний материаловедения и производственного процесса [12]. Кроме того, данный метод требует постоянного мониторинга процесса для обеспечения высокого качества создаваемой продукции.

Одной из центральных проблем в технологии строительной 3D-печати являются применяемые сырьевые смеси (на цементном, гипсовом и смешанном вяжущих), к которым предъявляются особые требования – необходимость обеспечения высокой формоустойчивости, формуемости, жизнеспособности и др. [13–15]. Данной проблеме посвящены различные работы [16–18], в которых приведены результаты исследований свойств смесей на минеральных вяжущих [19–21], адаптированных для данной технологии. Большое количество исследований на данную тему продолжается и по настоящее время.

Помимо неадаптированности сырьевых смесей, немаловажной проблемой является организация и осуществление системы контроля качества при аддитивном производстве строительной продукции методом 3D-печати [12,22]. Ввиду того, что экструзия является динамическим процессом, при выдавливании 3D-принтером смесь испытывает сдвиговые нагрузки, под воздействием которых она приобретает ту или иную вязкость. Бесконтрольное изменение в процессе экструзии реологических характеристик смеси может приводить к ухудшению качества строительной продукции – появлению различных дефектов, повреждений и несоответствий печатаемых изделий.

Авторами в работе [12] предложен способ регулирования скорости экструзии и поддержания заданного значения во время 3D-печати. Данный способ учитывает параметры печати, реологические свойства цементных смесей и позволяет поддерживать экструзию в определенном диапазоне со средней долей ошибок 6,7 %.

Для контроля свойств бетонной смеси при экструзии авторами работы [9] разработан автоматизированный интегрированный прибор «датчик-принтер» с многофункциональными возможностями проведения испытаний на пластическую прочность, сжатие, сдвиг и растяжение в процессе 3D-печати. Разработанная система интегрирована с 3D-принтером и управляется с главной станции. Данная разработка позволяет определять характеристики смеси для возможности наращивания печатаемых слоев и может быть признана эффективным способом контроля качества смеси.

Авторами в работе [23] разработана конструкция сопла 3D-принтера с изменяемой геометрией, которое может напрямую контролировать геометрию экструдата в процессе печати на каждом слое. Конструкция узла имеет регулируемую геометрию выпускного отверстия, которой можно управлять в ходе процесса.

Для обнаружения дефектов бетона при экструзии авторами в работе [24] предлагается методика компьютерного сканирования, которая включает следующую последовательность основных операций – получение изображений; межслоевая нарезка линий и слоев; определение характеристик геометрии и текстуры слоев; обнаружение дефектов. Получение изображения осуществляется с помощью камеры, прикрепленной к печатному соплу. Предлагаемый метод распознает и находит линии, разделяющие напечатанные слои с точностью 91%. Текстура материала классифицируется по четырем классам качества.

Однако стоит отметить, что автоматизация контроля качества сырьевых смесей и печатаемых изделий на их основе, устранение выявленных недостатков с целью получения качественной строительной продукции невозможны без определения видов возникающих дефектов, повреждений и несоответствий бетонов в технологии аддитивного строительного производства, что обуславливает актуальность данной работы.

Цель работы – разработать классификацию дефектов бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати).

Задачи исследования:

1. Осуществление контроля качества напечатанных на 3D-принтере образцов из бетонных и растворных смесей визуальным и измерительным методами.
2. Выявление дефектов, установление причин их возникновения, разработка определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства.

Объект исследований – бетонные и растворные смеси, изделия и конструкции, напечатанные на строительном 3D-принтере.

Предмет исследований – дефекты, повреждения, несоответствия бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати).

## 2. Материалы и методы

Определение дефектов выполнялось в период с 2019 по 2024 гг. в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета при выполнении экспериментальных исследований, аддитивного строительного производства изделий и конструкций.

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

Контроль качества напечатанного на 3D-принтере изделия для идентификации дефектов включал в себя визуальный и измерительный методы. Измерительный контроль произведен с использованием металлической линейки по ГОСТ 427-75, металлической рулетки по ГОСТ 7502-98, штангенциркуля ШЦ-1-150-0.1 по ГОСТ 166-89, увеличительной лупы по ГОСТ 25706-83, лазерного дальномера Leica D210, лазерного уровня Bosch (Рис.1).

Фиксация дефектов осуществлялась на этапах формования (3D-печати), твердения и эксплуатации.



Рис. 1. Фиксация дефектов при помощи увеличительной лупы (иллюстрация авторов)  
Fig. 1. Fixing defects by means of a magnifying glass (illustration by the authors)

Фотофиксация дефектов осуществлялась при помощи цифрового фотоаппарата Canon.

При выполнении работы применены общенаучные методы исследований – систематизации, классификации полученных результатов экспериментальных исследований.

### 3. Результаты и обсуждение

Дефекты в бетонах и растворах для аддитивного производства образуются вследствие нарушения технологического процесса их 3D-печати и/или условий твердения и/или условий эксплуатации, а также наследуются из материала исходного сырья, используемого при их получении.

В этой связи авторами данной работы разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства (таблица 1), а также приведены их фотоиллюстрации (рисунки 2-4).

Разработанная классификация видов дефектов бетонов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве позволит уточнить и расширить нормативную базу, регламентирующую требования к сырьевым материалам и оборудованию для 3D-печати, методам испытаний сырьевых смесей и изделий на их основе в технологиях аддитивного производства в строительстве и др.

Таблица 1

Классификация дефектов изделий и конструкций из бетонов и растворов в технологии 3D-печати

Группа	Условное обозначение	Вид дефекта	Определение
Дефекты формования	НПС	Нарушение прямолинейности сечения слоев	Отклонение геометрических характеристик поперечного сечения напечатанного композита, образовавшееся вследствие деформаций низлежащих слоев от вышележащих или от других факторов
	НПК	Нарушение прямолинейности кромки слоев	Циклическое отклонение положения кромки слоев относительно продольной оси по длине слоя, образовавшееся вследствие расшатывания бункера подачи установки аддитивного производства в процессе 3D-печати
	В	Волнистость (складчатость)	Дефект поверхности в виде незначительных периодических плавных возвышений и углублений на поверхности слоев
	РМС	Разрывы между слоями	Дефект поверхности в виде несплошности композиционного материала, уходящий в тело слоя, обычно расположенный перпендикулярно к его продольной оси, образовавшийся вследствие не слияния слоев материала при 3D-печати
	РДС	Разрывы по длине слоя	Дефект в виде локального разрыва напечатанного слоя различной величины, имеющий поперечное направление относительно продольной оси слоя
	РТЛ	Разнотолщинность	Отклонение формы, характеризующееся неравномерностью толщины слоя по длине и по высоте
	НФ	Нарушение формоустойчивости	Потеря устойчивости печатаемого образца в целом, характеризующаяся опрокидыванием образца, или потеря устойчивости формы печатаемого образца со смещением напечатанных слоев
	ИВ	Инородные включения	Дефект, расположенный на поверхности или внутри композита или полуфабриката в виде включений инородного тела (частиц)
	Н	Наплыв	Дефект поверхности слоя в виде выступа композиционного материала различной величины и формы
	З	Задир	Дефект поверхности в виде широкого, в основном, продольного углубления с неровным дном и краями (по ГОСТ 32597)
Дефекты, образующиеся при твердении	УТ	Усадочная трещина	Трещина, которая формируется в композиционном материале в результате образования напряжений вследствие усадки при твердении
	С	Слабое сцепление слоев	Дефект в виде пониженной величины адгезии (прочности сцепления) слоев друг к другу
	Р	Раковина	Дефект поверхности в виде углубления, имеющий вытянутую или точечную форму и беспорядочное расположение (по ГОСТ 32597)
Дефекты, образующиеся при эксплуатации	Ц	Царапина	Дефект поверхности, представляющий собой углубление в виде полосы, может быть неправильной формы и произвольного направления (по ГОСТ 32597)
	Т	Трещина	Дефект в виде локального разрыва композиционного материала различной величины, имеющего любое направление
	СК	Скол	Повреждение поверхности материала, вызванное механическими воздействиями

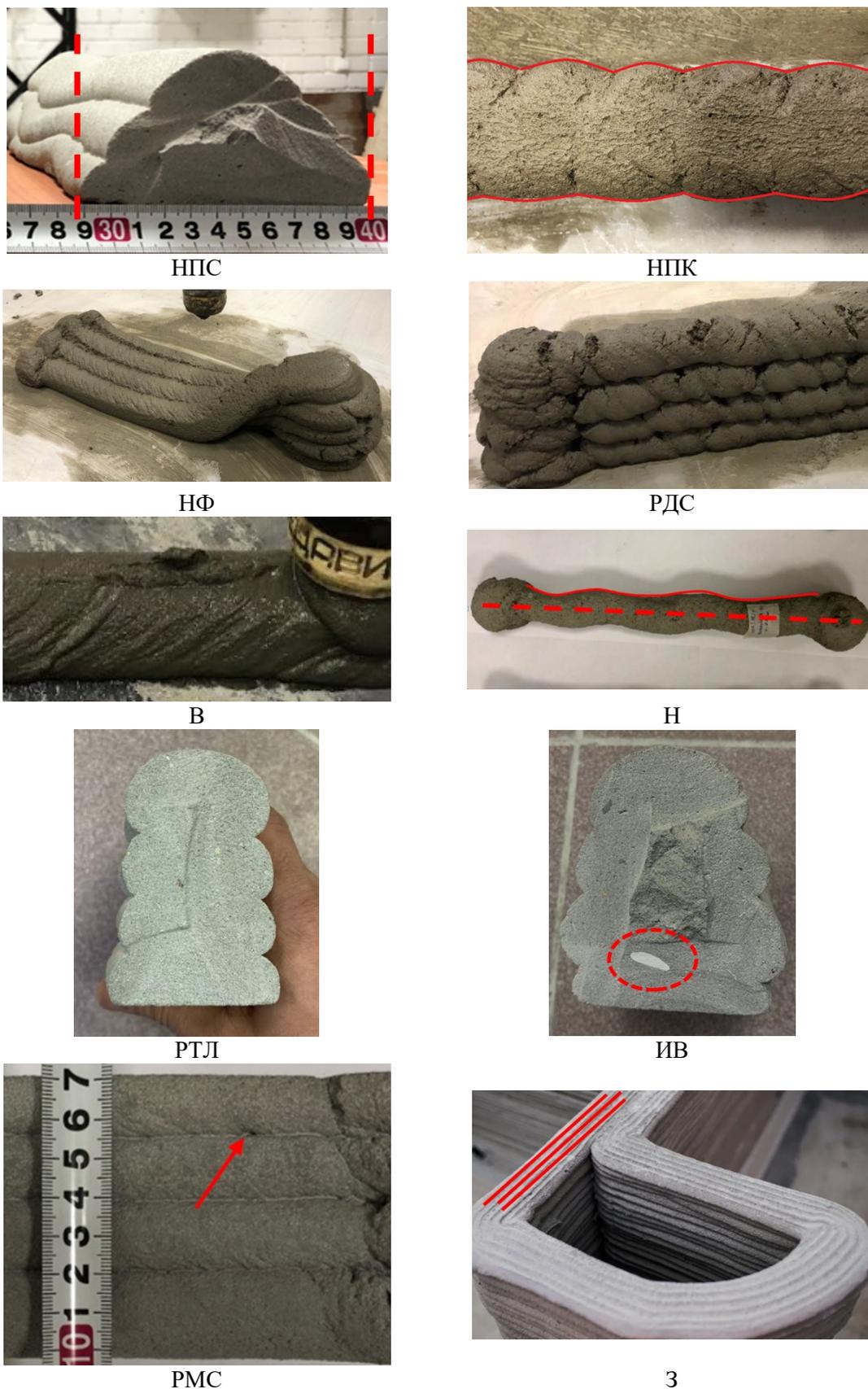


Рис. 2. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при формировании (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting from molding (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

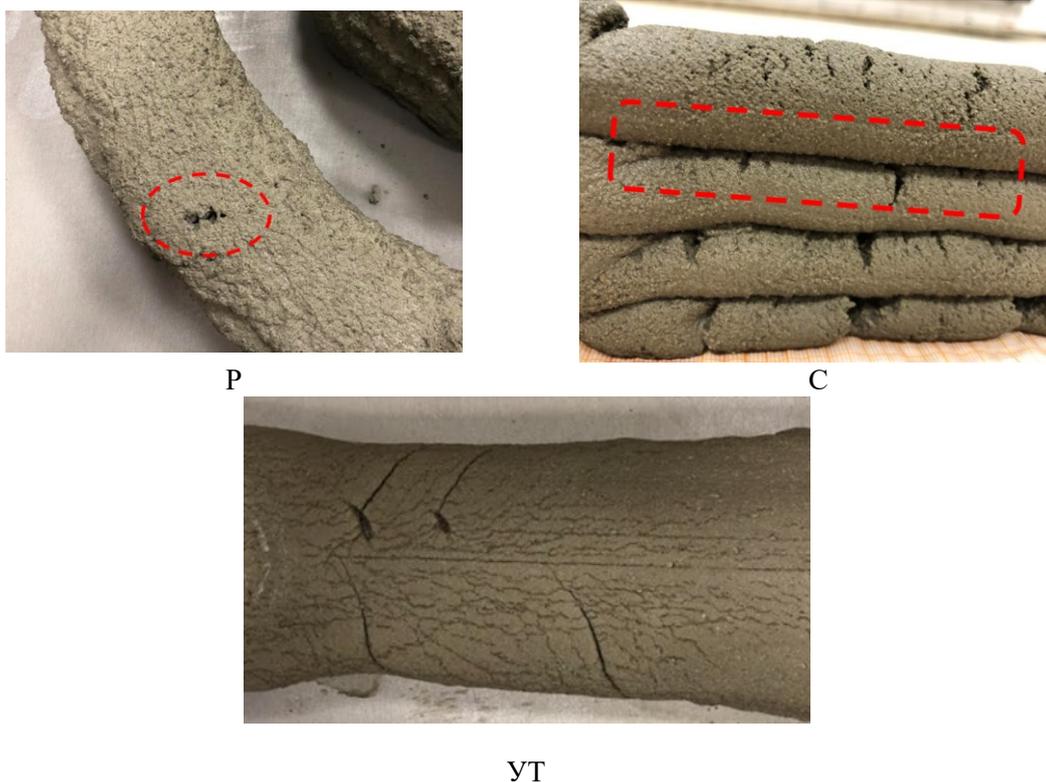


Рис. 3. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при твердении (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)  
 Fig. 3. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting from hardening (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

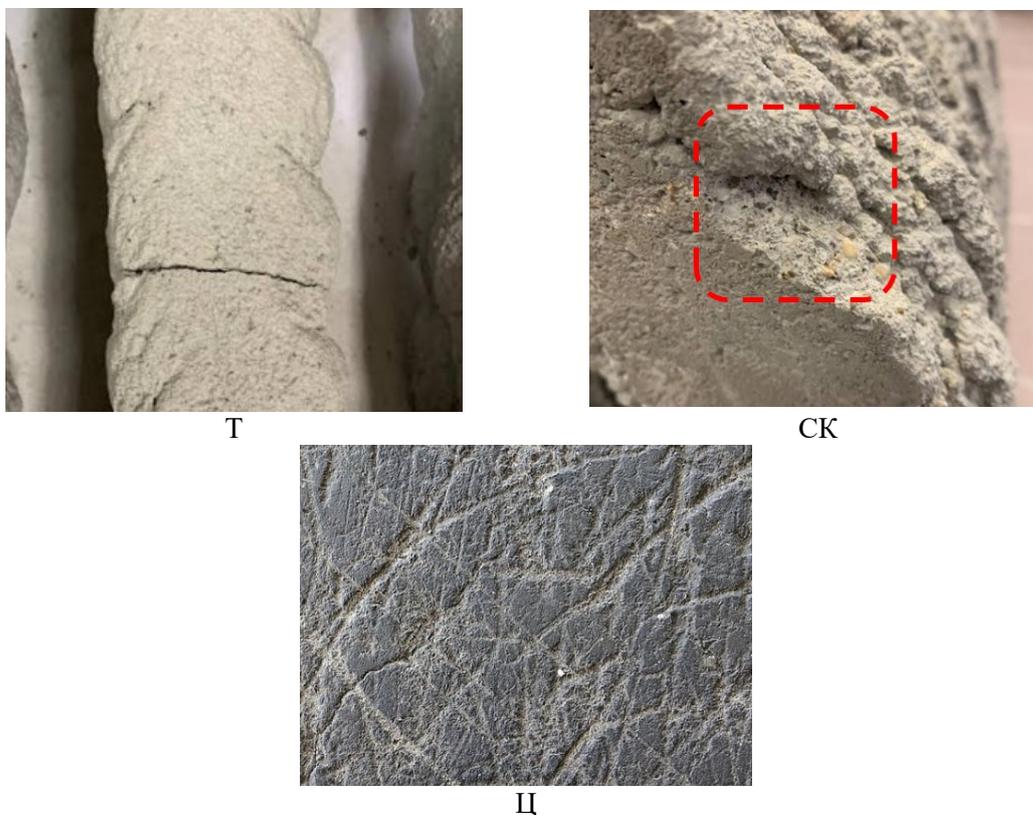


Рис. 4. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при эксплуатации (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)  
 Fig. 4. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting during operation (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

Полученные результаты согласуются с исследованиями [12, 22]. Эффект от внедрения предлагаемой классификации видов дефектов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве в нормативную базу строительной отрасли заключается в повышении качества бетонов и растворов в технологии 3D-печати, расширении номенклатуры строительной продукции, возможности оперативно и объективно выявить дефекты бетона и раствора в процессе аддитивного строительного производства и принять решение по их устранению (при необходимости), обеспечении единства терминологии дефектов изделий, возникающих в технологии аддитивного строительного производства, повышении качества строительной продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышение конкурентоспособности продукции российского производства.

#### 4. Заключение

1. Разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологиях аддитивного производства в строительстве, учитывающая их образование в процессе формования, твердения и эксплуатации.

2. Разработанная классификация видов дефектов бетонов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве направлена на обеспечение единства терминологии дефектов изделий, возникающих в технологии аддитивного строительного производства, повышение качества строительной продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышение конкурентоспособности продукции российского производства и рекомендуется для применения в документации всех видов научно-технической, учебной и справочной литературе.

#### Список литературы/ References

1. Загидуллина Г. М., Иванова Р. М., Новширванов М. Л. Роль технологий информационного моделирования в цифровой трансформации экономики. Анализ, перспективы развития // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8. Вып. 11. DOI 10.55186/2413046X\_2023\_8\_11\_573 [Zagidullina G. M., Ivanova R. M., Novshirvanov M. L. The role of information modeling technologies in the digital transformation of the economy. Analysis, development prospects // Moscow Economic Journal. 2023. Vol. 8. Iss. 11. DOI 10.55186/2413046X\_2023\_8\_11\_573].
2. Загидуллина Г. М., Новширванов М. Л., Иванова Р. М. Цифровая трансформация инвестиционно-строительной отрасли на примере технологий информационного моделирования // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2023. Вып. 3. С. 13-21 [Zagidullina G. M., Novshirvanov M. L., Ivanova R. M. Digital transformation of the investment and construction industry using the example of information modeling technologies // Economics of construction and housing and communal services. 2023. Iss. 3. P. 13-21].
3. Загидуллина Г. М., Бадькова И. Р., Иванова Р. М., Новширванов М. Л. Цифровизация региональной экономики в России на примере регионов - лидеров // International Agricultural Journal. 2023. Т. 66. Вып. 6. – DOI 10.55186/25876740\_2023\_7\_6\_28 [Zagidullina G. M., Badykova I. R., Ivanova R. M., Novshirvanov M. L. Digitalization of the regional economy in Russia using the example of leading regions // International Agricultural Journal. 2023. Vol. 66. Iss. 6. – DOI 10.55186/25876740\_2023\_7\_6\_28].
4. Матвеев К.С., Хузиахметова К.Р., Низамов Р.К. Экструзия как способ переработки полимерных материалов // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова. 2023. С. 134–139 [Matveev K.S., Huziahmetova K.R., Nizamov R.K. Extrusion as a method of processing polymer materials // Materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, dedicated to the memory of Professor V.I. Kalashnikov. 2023. P. 134–139].
5. 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. Вып. 6. С. 834–846 [Korolev E.V., Zyong T.K., Inozemcev A.S. Method for providing

- internal hydration care for cement in 3D printing compositions // Vestnik MGSU. 2020. Vol. 15. Iss. 6. P. 834–846].
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 7. Вып. 118. С. 863–876 [Inozemcev A.S., Korolev E.V., Zyong Than' Kuj. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 7. Iss. 118. P. 863–876].
  7. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А. Аддитивное строительное производство: особенности применения технологии // Промышленное и гражданское строительство. 2023. Вып. 7. С. 70–78 [Adamceovich A.O., Pustovgar A.P., Adamceovich L.A. Additive construction manufacturing: features of technology application // Industrial and civil engineering. 2023. Iss. 7. P. 70–78].
  8. 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. No. 1. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012065.
  9. Rehman A.U., Kim I.G., Kim J.H. Towards full automation in 3D concrete printing construction: Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete // Developments in the Built Environment. Elsevier Ltd. 2024. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100344.
  10. Ter Haar B., Kruger J., van Zijl G. Off-site construction with 3D concrete printing // Autom Constr. Elsevier. 2023. Vol. 152. P. 104906. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2023.104906.
  11. Leschok M., Cheibas I., Piccioni V., Seshadri B., Schlüter A., Gramazio F., Kohler M., Dillenburger B. 3D printing facades: Design, fabrication, and assessment methods // Autom Constr. Elsevier. 2023. Vol. 152. P. 104918. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2023.104918.
  12. Ahi O., Ertunç Ö., Bundur Z., Bebek Ö. Automated flow rate control of extrusion for 3D concrete printing incorporating rheological parameters // Autom Constr. Elsevier. 2024. Vol. 160. P. 105319. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2024.105319.
  13. Sonebi M., Perrot A. Effect of mix proportions on rheology and permeability of cement grouts containing viscosity modifying admixture // Constr Build Mater. 2019. Vol. 212. P. 687–697. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.022.
  14. Chen L., Chaves F. Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 9. P. 1809. DOI: 10.3390/app9091809.
  15. Tao Y., Lesage K., Van Tittelboom K., Yuan Y., De Schutter G. Influence of substrate surface roughness and moisture content on tensile adhesion performance of 3D printable concrete // Cem Concr Compos. Elsevier. 2022. Vol. 126. P. 104350. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104350.
  16. Tay Y., Panda B., Paul S., Tan M., Qian S., Leong K., Chua C. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing // Materials Science Forum. 2016. P. 177–181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.861.177.
  17. Zhang Y., Zhang, Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink // Constr Build Mater. Elsevier Ltd. 2018. Vol. 174. P. 263–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115.
  18. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102. Iss. 2.
  19. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste // Key Eng Mater. 2019. Vol. 799. P. 282–287. DOI: 10.18720/MCE.84.10.
  20. Chen Y., Chaves F., Yalçinkaya Ç., Çopuroğlu O., Veer F., Schlangen E. The Effect of Viscosity-Modifying Admixture on the Extrudability of Limestone and Calcined Clay-

- Based Cementitious Material for Extrusion-Based 3D Concrete Printing // *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 9. P. 1374. DOI: 10.3390/ma12091374/
21. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 169. P. 1–13.
  22. Buswell R., Xu J., Becker D., Dobrzanski J., Provis J., Kolawole J., Kinnell P. Geometric quality assurance for 3D concrete printing and hybrid construction manufacturing using a standardised test part for benchmarking capability // *Cem Concr Res.* Pergamon. 2022. Vol. 156. P. 106773. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2022.106773.
  23. Lao W., Li M., Tjahjowidodo T. Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing // *Addit Manuf.* Elsevier. 2021. Vol. 37. P. 101638. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2020.101638.
  24. Rill-García R., Dokladalova E., Dokládál P., Caron J., Mesnil R., Margerit P., Charrier M. Inline monitoring of 3D concrete printing using computer vision // *Addit Manuf.* Elsevier. 2022. Vol. 60. P. 103175. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2022.103175.

#### Информация об авторах

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

E-mail: muhametrahimov@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.

E-mail: muhametrahimov@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