

Научная статья
УДК 69.001.5
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/139-154>

Влияние технологических свойств цементной смеси на качество слоистых 3D-печатных элементов

Павел Юрьевич Юров[✉], Давут Ресулович Каракчи-Огли

Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация
[✉] yurov.py@yandex.ru

Аннотация. В связи с актуальностью проблемы управления качеством процесса 3D-печати целью работы являлось обоснование рационального диапазона технологических характеристик смеси для обеспечения устойчивости печатной конструкции и прочностных характеристик слоистого композита. Для проведения экспериментальных исследований использовалась микрoзернистая смесь для 3D-печати запатентованного состава. Для оценки технологических характеристик в работе применили комплексный критерий оценки технологичности смеси для 3D-печати по показателю пластической прочности, определяемый с использованием специально разработанного конического пластометра. По результатам апробации прибора установлена его пригодность для оперативного контроля качества смеси во всём технологически возможном диапазоне условий печати. В процессе исследований на лабораторном 3D-принтере производилась печать модельного элемента, оценивалось его качество и устойчивость. После твердения элемент распиливался на образцы нормированных размеров для испытаний на прочность при сжатии и изгибе вдоль и поперёк направления укладки печатных слоёв. Установлено, что для обеспечения качества и устойчивости печатной конструкции рациональный диапазон значений пластической прочности составляет 0,8–2,8 кПа. По критерию прочности слоистого 3D-печатного композита – 0,8–1,8 кПа. При увеличении значений пластичности выше 1,8 кПа зафиксировано падение прочности сцепления слоёв и прочности композита, что приводит к снижению прочности слоистого композита при изгибе и сжатии.

Ключевые слова: 3D-печать, пластичность смеси, метод контроля пластичности, прочность 3D-печатного композита

Для цитирования: Юров П.Ю., Каракчи-Огли Д.Р. Влияние технологических свойств цементной смеси на качество слоистых 3D-печатных элементов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 139–154.

Original article

Effect of cement mixture technological properties on the layered 3D-printed elements quality

Pavel Yu. Yurov[✉], Davut R. Karakchi-Ogli

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
[✉] yurov.py@yandex.ru

Abstract. In connection with the relevance of quality control problem of the 3D printing process, the aim of the work was to substantiate the rational range of mixture technological properties to ensure the stability of the printed structure and the 3D-printed concrete strength properties. The patented composition of powder-like 3D printable mixture was used in the experiments. In order to evaluate the technological properties, we used

a complex criterion for assessing the manufacturability of the 3D printable mixture in terms of plastic strength, determined using a specially designed conical plastometer. According to the results of the approval of the device, its suitability for operational control of the mixture quality in the whole technologically possible range of printing conditions was established. As part of the research, a model element was printed on a laboratory 3D printer and its quality and stability were evaluated. After curing, the element was sawn into samples of standardised sizes for compressive and flexural tests along and across the layer's printing direction. It was found that to ensure the quality and stability of the printed structure, the reasonable range of plastic strength values is 0.8–2.8 kPa. According to the strength criteria of layered 3D printed concrete the reasonable range of plastic strength is 0.8–1.8 kPa. When the plasticity values increase above 1.8 kPa, a decrease in the bonding strength of the layers and the compressive and flexural strength of the 3D printed concrete is recorded.

Keywords: 3D printing, mixture plasticity, plasticity control method, 3D-printed concrete strength

For citation: Yurov P.Yu., Karakchi-Ogli D.R. Effect of cement mixture technological properties on the layered 3D-printed elements quality. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 139–154. (In Russ.).

Введение

Внедрение аддитивных технологий (АТ) в строительстве в настоящее время ограничивается изготовлением объектов дизайна городской среды (малых архитектурных форм) и малоэтажным гражданским строительством. Расширение области применения АТ связывается со специальным строительством (например, для сельскохозяйственных сооружений) и индустриальным домостроением (дизайн фасадов для сборного строительства) [1, 2]. Однако, несмотря на высокий потенциал, аддитивная технология (3D-печать) ещё не стала крупномасштабной производственной строительной технологией.

Одной из нерешённых проблем является оперативное регулирование процесса в соответствии с изменением технологических свойств смеси в жизненном цикле печати от момента приготовления до послышной укладки. Регулирование параметров процесса на основе данных об изменении свойств смеси необходимо для обеспечения геометрического соответствия и качества поверхности 3D-печатного строительного объекта.

В строительной практике для оценки технологических свойств смеси для 3D-печати применяются следующие базовые методы оценки характеристик смеси:

- встряхивающий тест с контролем диаметра расплыва смеси по ГОСТ Р 57812-2017 для оценки текучести;
- пенетрометрический тест [3, 4] для оценки пластичности;
- сдавливающий тест, реализуемый при нагружении свежееотформованного образца смеси, при этом показателем формоустойчивости является коэффициент деформирования под нагрузкой [5, 6].

Данные методы не позволяют осуществлять оперативный контроль качества смеси, не обеспечивают возможность использования результатов контроля для автоматизированного регулирования процесса 3D-печати. Как показывает анализ опыта контроля и регулирования процесса печати [7, 8], характеристики смеси контролируются до начала печати; параметры процесса задаются на основании данных первичного контроля и в процессе печати не регулируются. При отсутствии такого регулирования из-за быстрого изменения технологичности смеси (текучести и пластичности) для 3D-печатных строительных объектов характерно трещинообразование, дефектность слоёв (рисунок 1).

Качество 3D-печатных строительных объектов существенно зависит от прочности материала единичного слоя и слоистого композита в целом. В исследованиях [9–11] было установлено, что монолитные образцы (материал слоя) демонстрируют более высокую прочность, чем 3D-печатные образцы, и лишь в некоторых из них [12–14] 3D-печатные образцы показывают более высокую прочность, чем монолитные. Из-за анизотропного поведения слоистых структур их прочность также зависит от направления нагружения.

В обзоре A.U. Rehman and J.H. Kim [15] обобщены и сопоставлены данные нескольких десятков исследований, согласно которым приведены соотношения между прочностью слоис-

тых 3D-печатных образцов вдоль слоёв (R_x) и перпендикулярно (R_y) слоям и прочностью материала слоя (R_c). При этом диапазон вариативности данных соотношений для результатов разных исследований очень значителен и составляет:

- прочность при сжатии $R_{cx}/R_{cc} = 0,5-1,1$; $R_{cy}/R_{cc} = 0,6-1,1$;
- прочность при изгибе $R_{fx}/R_{fc} = 0,3-0,9$; $R_{fy}/R_{fc} = 0,9-1,3$.

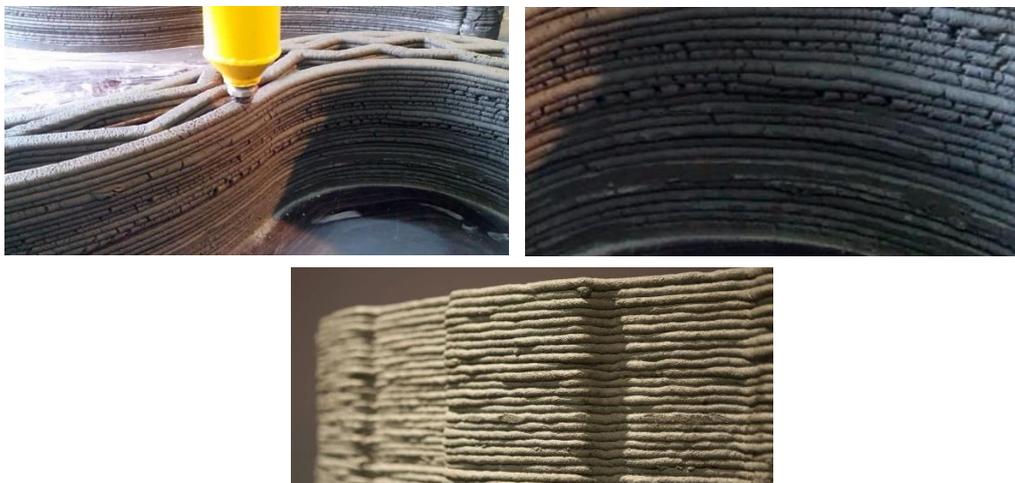


Рис. 1. Типичные виды дефектов 3D-печатных объектов

Fig. 1. Typical defects in 3D-printed objects

Очевидно, что прочность 3D-печатных бетонов определяется прочностью контакта на горизонтальных или вертикальных границах раздела слоёв. Согласно теории адгезии, одним из ключевых факторов формирования прочного адгезионного соединения являются условия смачивания на границе контакта. Количество свободной жидкой фазы в вязкопластичной цементной смеси быстро убывает вследствие развития процессов гидратации, что ухудшает условия смачивания на границе контакта печатных слоёв. С точки зрения технологических свойств, уменьшение содержания жидкой фазы в смеси проявляется в виде снижения её текучести и пластичности.

Поэтому можно предположить, что данные показатели должны находиться в некотором рациональном диапазоне для обеспечения устойчивости и качества 3D-печатных объектов, с одной стороны, а также прочности их слоистой структуры после затвердевания, с другой стороны. При этом необходим постоянный контроль характеристик смеси с возможностью оперативного регулирования процесса печати.

Цель данного исследования – обоснование рационального диапазона технологических характеристик смеси для обеспечения устойчивости печатной конструкции и прочностных характеристик слоистого композита.

Задачи исследования:

- обосновать критерий оценки технологических характеристик смеси для 3D-печати;
- установить диапазон значений критерия оценки технологических характеристик смеси для 3D-печати, обеспечивающий устойчивость 3D-печатных элементов;
- уточнить диапазон значений технологических характеристик смеси для 3D-печати по критерию прочности слоистого 3D-печатного композита.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований использовалась микрозернистая смесь для 3D-печати (патент RU 2729283 C1), состав которой был оптимизирован в предыдущих исследованиях [16] в отношении экструдированности, пластичности и прочности материала слоя (таблица 1).

В смеси использовали следующие компоненты:

- портландцемент СЕМ I 42,5 (ГОСТ 31108-2016);
- техническая вода (ГОСТ 23732-2011);
- пластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров (марки Sika® ViscoCreate® T100);
- метакаолин (модификатор вязкости) марки ВМК-45 (содержание $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \sim 98\%$, размер частиц 1–5 мкм)
- полипропиленовое волокно $l = 12$ мм, $d = 0,022\text{--}0,034$ мм (ГОСТ 32085-2013);
- известняковая мука с содержанием $CaCO_3 \sim 95\%$; размером частиц 10–75 мкм (ГОСТ 14050-93).

Таблица 1 / Table 1

Состав смеси для 3D-печати
The mix design of 3D printable mixture

Вид смеси	Компоненты/масса цемента (%)					В/Ц
	Пластификатор	Метакаолин	Полипропиленовое волокно	Известняковая мука	Цемент	
Патент RU 2729283	1,2	2	0,5	100	100	0,38–0,49

Приготовление смеси для испытаний производилось путём перемешивания сухой смеси с затворителем в смесителе принудительного действия по ГОСТ 30744-2001.

В качестве комплексного критерия технологичности смеси для 3D-печати апробировали эффективность использования показателя пластической прочности, который определяется как способность материала выдерживать значительные остаточные деформации без разрушения. Метод измерения пластической прочности на коническом пластометре был разработан П.А. Ребиндером и основан на определении нагрузки, необходимой для погружения металлического конуса с заданным углом при вершине в исследуемую массу на фиксируемую глубину:

$$P_m = K_a \times F / h_m^2, \tag{1}$$

где P_m – пластическая прочность, K_a – константа конуса ($K_a 45^\circ = 0,416$), F – прилагаемое усилие, h_m – глубина погружения конуса (20 мм).

Для реализации метода в задачах оперативного контроля был разработан конический пластометр [17] (рис. 2). Прибор построен на плате Arduino Nano. При погружении конуса в смесь на заданную глубину происходит считывание прилагаемого усилия тензодатчиком. После плата рассчитывает пластическую прочность (уравнение 1) и выводит максимальные значения на экран. В качестве исполнительного механизма принят конус пластометра конструкции МГУ с углом 45° и глубиной погружения конуса $h_m = 20$ мм.

На первом этапе экспериментов для оценки эффективности предложенного критерия и адекватности метода измерений пластичности смеси изучалась зависимость влияния температуры смеси и времени выдержки на величину её пластической прочности (табл. 2).

На втором этапе эксперимента изучалось влияние пластической прочности на качество модельного печатного элемента. Для реализации эксперимента производилась печать модельных стеновых элементов длиной $\sim 60\text{--}80$ см, шириной 4 см, высотой 16–20 см. Сечение слоя составляет $4 \times 1,5$ см, количество печатных слоев – 11–15. Схема печати модельной конструкции представлена на рис. 3. При проведении исследований приняты следующие режимы печати:

- постоянная скорость печати – 2 см/с;
- постоянное расстояние между соплом и слоем – 2 см.

Фактором варьирования технологичности смеси принято изменение В/Ц в диапазоне от 0,38 до 0,49 при сохранении массовых соотношений остальных компонентов (табл. 1).

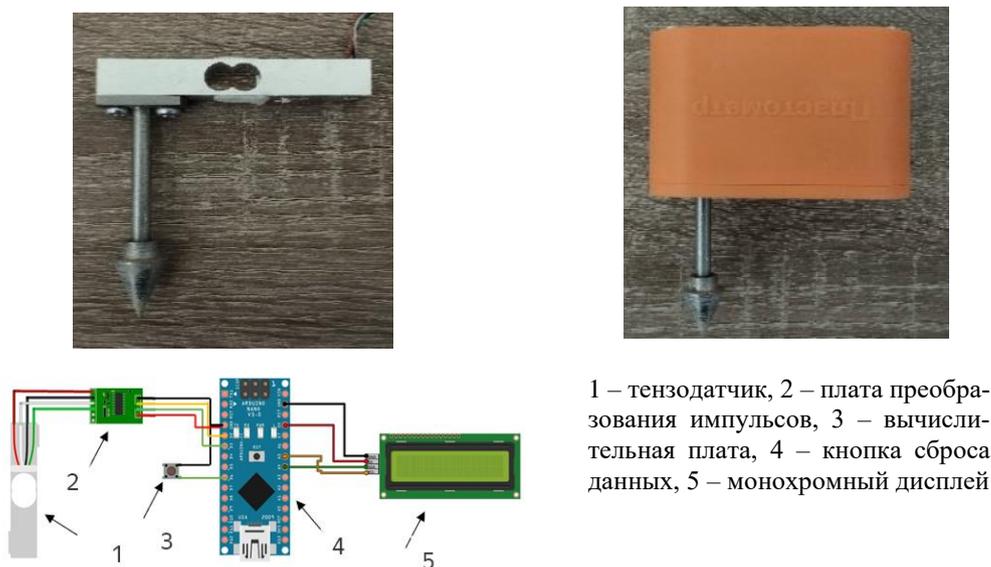


Рис. 2. Фото и схема устройства пластометра для оперативного контроля качества смеси

Fig. 2. Photo and scheme of the device for mixture quality operational control

Таблица 2 / Table 2

Матрица испытаний первого этапа эксперимента
The test matrix of the first experimental stage

Температура смеси	Временные промежутки контроля технологических характеристик	Контролируемый параметр
$5 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	После перемешивания На выходе из экструдера каждые 0, 5, 10, 20, 30 мин	Пластическая прочность $P_m = K_a \times F/h_m^2$
$25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
$35 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$		

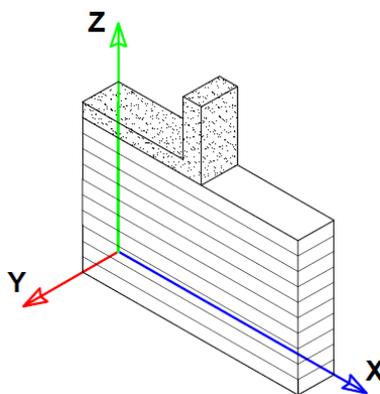


Рис. 3. Схема 3D-печати модельного элемента

Fig. 3. Scheme of 3D printing model element

Контролировались следующие параметры качества и устойчивости модельного элемента:

- дефектность слоёв (фотофиксация);
- пластичность смеси при помощи разработанного пластометра, через 5 мин после приготовления;
- общая вертикальная деформация стены Δ , мм

$$\Delta_{\text{прод}} = l_{\text{эт}} - l_{\text{сл}}; \tag{2}$$

- коэффициент деформирования нижнего слоя смеси

$$v_n = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} \tag{3}$$

На третьем этапе эксперимента изучалось влияние пластической прочности смеси на прочность слоистого 3D-печатного композита. Для этого производилась печать модельных стеновых элементов длиной аналогично схеме и режимам печати для второго этапа.

В связи с отсутствием стандарта для испытаний 3D-печатных композитов, при обосновании схем испытания, формы и размеров контрольных образцов исходили из того, что прочностные характеристики печатных образцов [18] определяются в двух [19] или трёх [20] направлениях приложения нагрузки по отношению к направлению печати:

- X – направление вдоль траектории движения печатного сопла;
- Y – направление поперёк траектории движения печатного сопла,
- Z – направление перпендикулярно плоскости XY.

Анализ результатов исследований позволил установить, что наиболее существенные отличия получены при приложении нагрузки по направлениям X и Z.

Поэтому были приняты следующие схемы разрезки (рис. 4) и испытаний 3D-печатных композитов (табл. 3, рис. 5):

- испытание на сжатие при приложении нагрузки поперёк направления печати (ось Z) – 3 призматических образца в серии;
- испытание на сжатие при приложении нагрузки вдоль напечатанного направления (ось X) – 6 образцов полупризмы в серии;
- испытание на изгиб при приложении нагрузки поперёк направления печати (ось Z) – 3 призматических образца в серии;
- испытание на раскалывание для оценки прочности межслоевого соединения с сосредоточенным усилием вдоль граничной поверхности в образце вдоль направления печати (ось Y) – 3 призматических образца в серии.

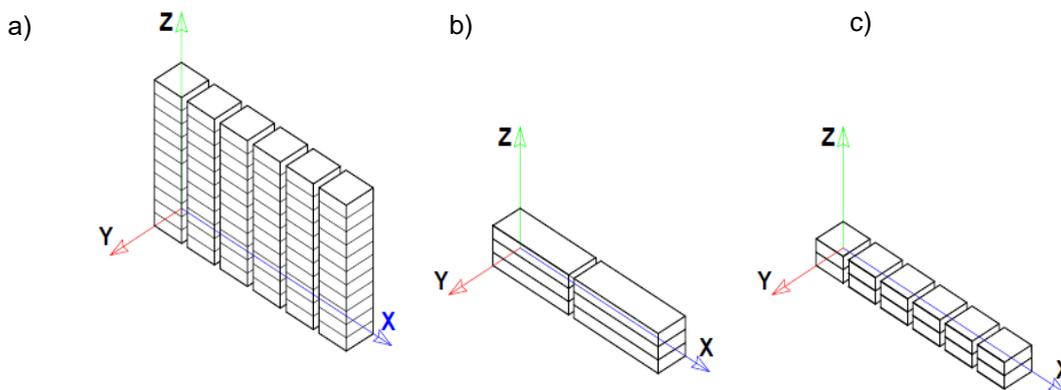


Рис. 4. Схема разрезки 3D-печатной модельной конструкции:
(а) испытание на сжатие (ось Z), (б) испытание на сжатие (ось X) и изгиб (оси Y, Z),
(с) испытание на раскалывание (ось Y)

Fig. 4. Cutting scheme of the 3D printed model element:
 (a) compression test (Z axis), (b) compressive test (X axis), bending test (Y, Z axis),
 (c) splitting test (Y axis)

Таблица 3 / Table 3

Матрица испытаний третьего этапа эксперимента
 The test matrix of the third experimental stage

Определяемые характеристики	Схема испытаний	Пластичность
Прочность при сжатии, МПа	a, b	В установленном на первом этапе эксперимента диапазоне значений пластической прочности
Прочность при изгибе, МПа	d, e	
Прочность при сдвиге слоёв, МПа	c	

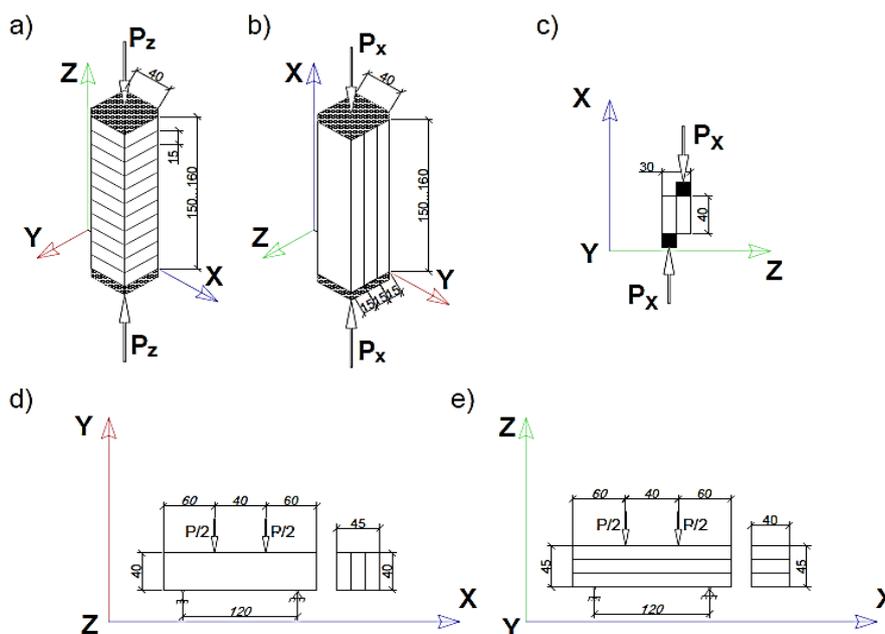


Рис. 5. Схемы испытаний 3D-печатных образцов: (а) испытание на сжатие (ось Z), (б) испытание на сжатие (ось X), (с) испытание на раскалывание (ось X), (д) испытание на четырёхточечный изгиб (ось Y), (е) испытание на четырёхточечный изгиб (ось Z)

Fig. 5. Test scheme of the 3D printed samples: (a) compression test (Z axis), (b) compression test (X axis), (c) splitting test (X axis), (d) four-point bending test (Y axis), (e) four-point bending test (Z axis)

Результаты и их обсуждение

Кинетика изменения пластической прочности смеси

По результатам исследований установлено (рис. 6), что при температуре смеси 5 °С начальное значение прочности $R_{пл}$ составило 0,41 кПа, конечное – $R_{пл} = 2$ кПа. Нагретая до температуры 35 °С смесь имела начальное значение $R_{пл} = 2,2$ кПа, конечное – $R_{пл} = 3,7$ кПа. При температуре смеси 25 °С начальное значение составило $R_{пл} = 1,5$ кПа, конечное $R_{пл} = 3,5$ кПа.

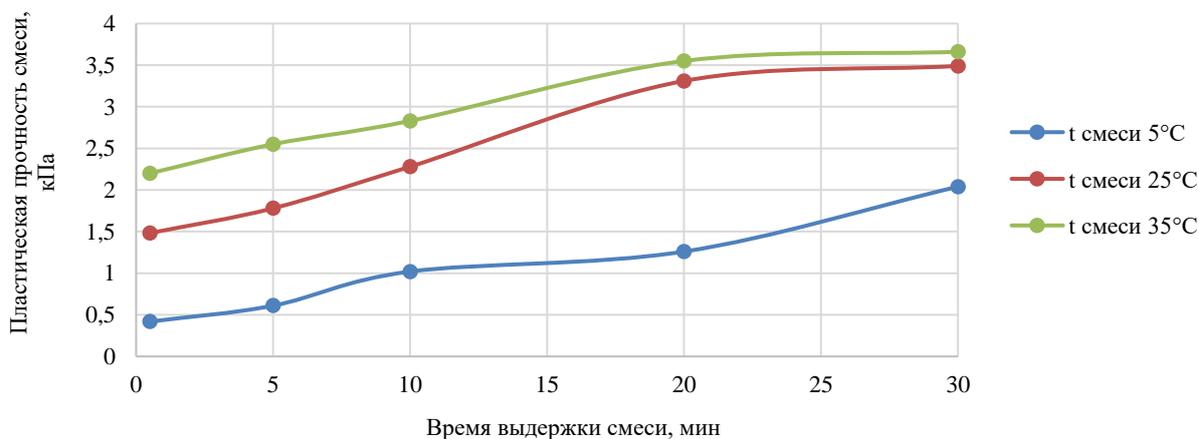


Рис. 6. Кинетика набора пластической прочности смеси

Fig. 6. Kinetics of plastic strength of the mixture

Таким образом, при варьировании температуры смеси начальные значения пластической прочности $R_{пл}$ отличались в 4,5 раза, а конечные – в 1,5 раза. Закономерно, что наиболее высокие значения $R_{пл}$ зафиксированы для нагретой смеси, что обусловлено интенсификацией

процессов гидратации цемента. Понижение температуры смеси до 5 °С, напротив, способствует увеличению продолжительности индукционного периода гидратации и соответствующему замедлению процесса схватывания.

Важно отметить (табл. 4), что в начальный период 0–15 мин наиболее высокая скорость набора прочности характерна для смеси с температурой 25 °С, наименьшая – при её температуре 5 °С. Во временном интервале 15–30 мин, напротив, происходит ускорение набора $R_{пл}$ при температуре смеси 5 °С и замедление при температуре 25–35 °С. В результате можно констатировать, что при увеличении температуры смеси до 35 °С имеется опасность потери работоспособности смеси уже через 15 минут после приготовления. Сохранность свойств смеси при более низкой температуре может быть обеспечена во временном интервале до 30 минут. При этом гидратационный потенциал цементной системы сохраняется, о чём свидетельствует ускорение набора пластической прочности после 20 минут выдержки смеси.

Таблица 4 / Table 4

Скорость возрастания пластической прочности смеси
Rate of plastic strength increase of the mixture

Температура смеси, °С	Значения скорости (кПа/мин) во временном интервале	
	0–15 мин	15–30 мин
5	0,05	0,06
25	0,09	0,05
35	0,07	0,03

Таким образом, варьирование температуры смеси является действенным технологическим инструментом регулирования работоспособности смеси в процессах 3D-печати и может быть использовано как фактор управления процессом в зависимости от конкретных условий (скорости печати, размеров объекта и т.д.).

С точки зрения адекватности метода контроля и работоспособности разработанного прибора можно констатировать, что данный конический пластометр доказал способность производить измерения во всём технологически допустимом для условий 3D-печати диапазоне значений пластичности смеси. Таким образом, прибор возможно использовать для задач оперативного контроля технологичности смеси, а использование современной электроники даёт возможность встраивания данного прибора в автоматизированный комплекс 3D-печати.

Влияние пластической прочности смеси на качество модельных печатных элементов

Установлено (табл. 5), что в диапазоне пластической прочности $R_{пл} = 2,8–4,0$ кПа происходит образование дефектов слоёв, слои не оплывают, выдерживают нагрузку от вышележащих слоёв. При $R_{пл} \geq 4,0$ кПа смесь не перекачивается, при $R_{пл} \leq 0,8$ кПа происходит оплыв слоёв, нижележащие слои не выдерживают нагрузку вышележащих.

Таблица 5 / Table 5

Результаты контроля качества модельных печатных элементов
Quality control results of the 3D-printed model elements

Пластическая прочность $R_{пл}$, кПа	Общая вертикальная деформация стены Δ , мм	Коэффициент деформирования нижнего слоя смеси, ν	Дефектность слоёв (фотофиксация)
4,5	4,1	1,02	
2,6	4,6	1,13	

Окончание табл. 5 / End of table 5

Пластиче- ская проч- ность $R_{пл}$, кПа	Общая вертикаль- ная деформация стены Δ , мм	Коэффициент деформирования нижнего слоя смеси, υ	Дефектность слоёв (фотофиксация)
1,5	19,2	1,11	
1,2	21,8	1,28	
0,9	20,6	1,38	
0,4	24,0	1,93	

Полученные данные о взаимосвязи пластичности смеси и качества модельных печатных объектов (рис. 7) позволили установить диапазон значений $R_{пл} = 0,8-2,8$ кПа, необходимый для обеспечения оптимального качества печати. В данном диапазоне пластической прочности смеси не наблюдается образование дефектов слоёв, слои не оплывают, выдерживают нагрузку от вышележащих слоёв. Диапазон значений $R_{пл} = 0,8-2,8$ кПа принят в качестве граничного для обеспечения качества печатных конструкций. На основании этого третий этап эксперимента по исследованию влияния пластической прочности на прочностные характеристики композита реализован для смесей с пластичностью в данном диапазоне варьирования $R_{пл}$.

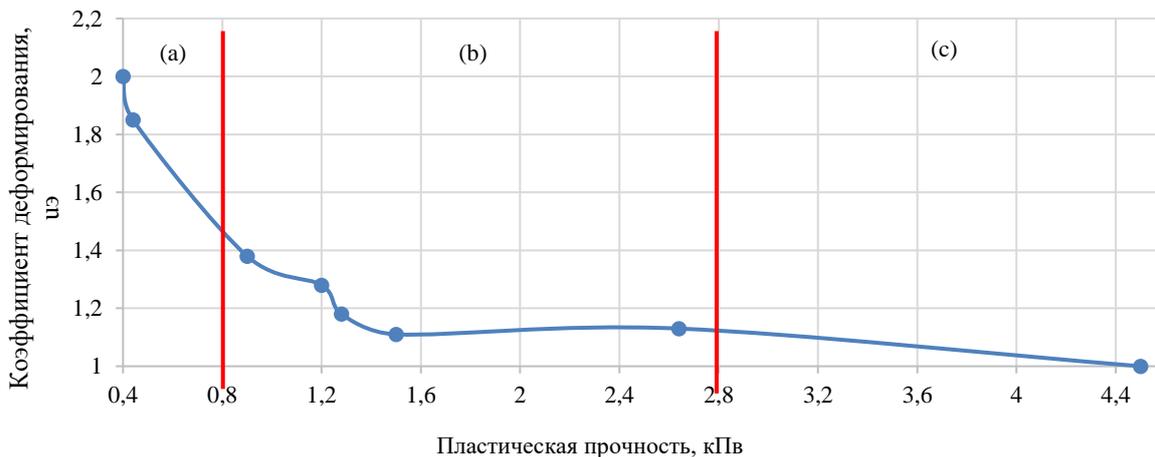


Рис. 7. Зависимость коэффициента деформирования слоя 3D-печатных элементов от пластической прочности смеси: (а) зона неустойчивости, (б) оптимальное качество элемента, (с) зона дефектности слоёв

Fig. 7. The deformation coefficient dependence of the 3D printed elements layer on the mixture plastic strength:

(a) the unstable zone, (b) the optimal quality of structures, (c) the zone of layer's defects

Закономерности изменения прочностных характеристик 3D-печатных композитов
 Результаты испытаний представлены в табл. 6 и на рис. 8 и 9.

Результаты испытания контрольных образцов
Test results of control samples

Пластиче- ская проч- ность смеси, $R_{пл}$	Сдвиг слоёв по оси X, $R_{сдв}$	Сжатие по оси Z (поперёк слоя), $R_{сж}^z$	Сжатие по оси X (вдоль слоя), $R_{сж}^x$	Изгиб по оси Z (поперёк слоя), $R_{изг}^z$	Изгиб по оси Y (с торца слоя), $R_{изг}^y$
0,8	3,29	21,87	25,20	3,39	3,26
1,0	3,74	20,80	25,48	4,20	3,90
1,8	3,36	23,99	25,32	3,18	2,99
2,6	2,52	22,70	20,98	3,65	3,06
2,7	1,86	19,71	21,10	3,02	2,43

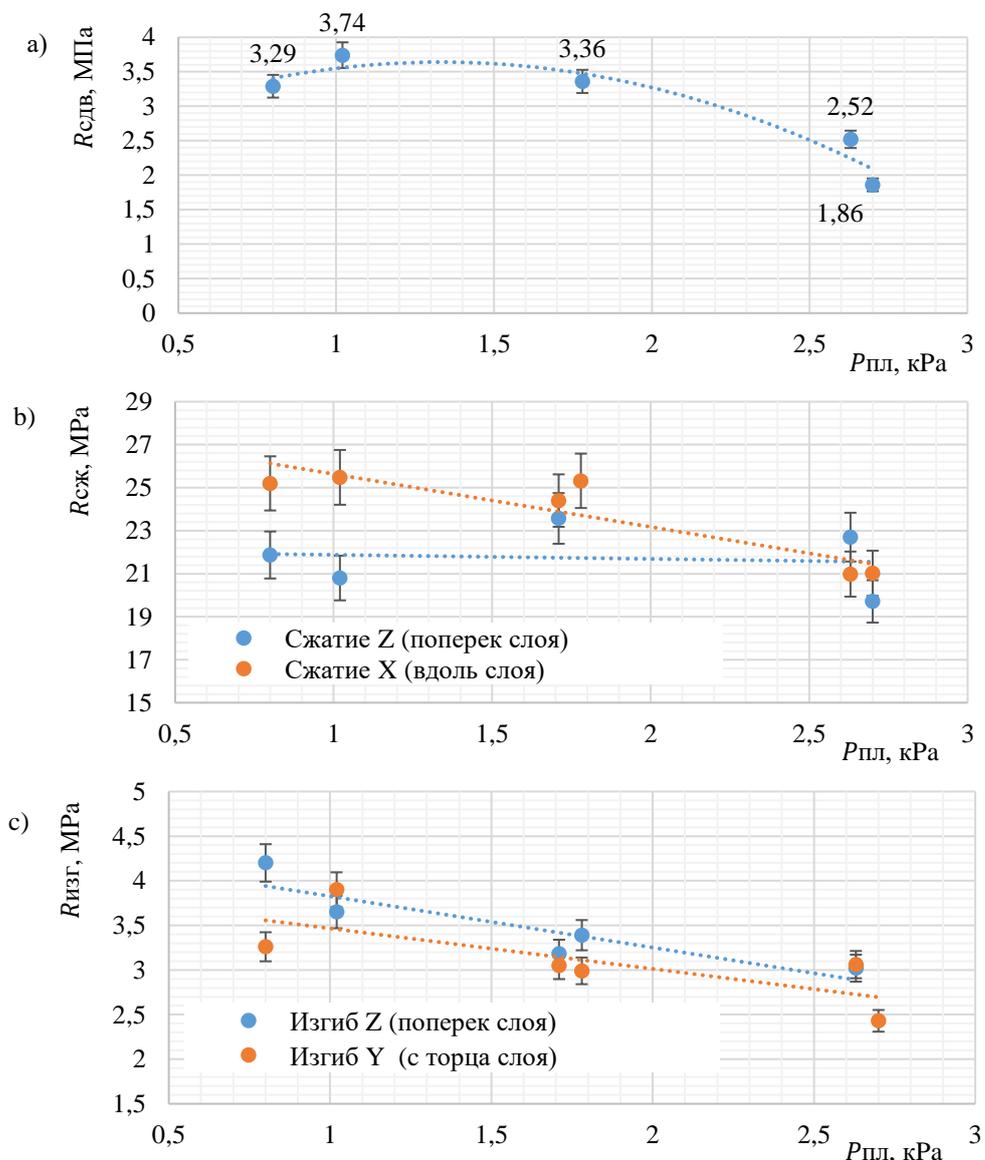


Рис. 8. Зависимость прочности сцепления слоёв 3D-печатного композита от пластической прочности смеси:

(а) сдвиг слоёв по оси X, (б) сжатие по осям Z и Y, (с) изгиб по осям Z и Y

Fig. 8. Dependence of the 3D-printed composite layers adhesion strength on the mixture plastic strength: (a) shear of the layers along the X axis, (b) compression along the Z and Y axes (c) bending along the Z and Y axes

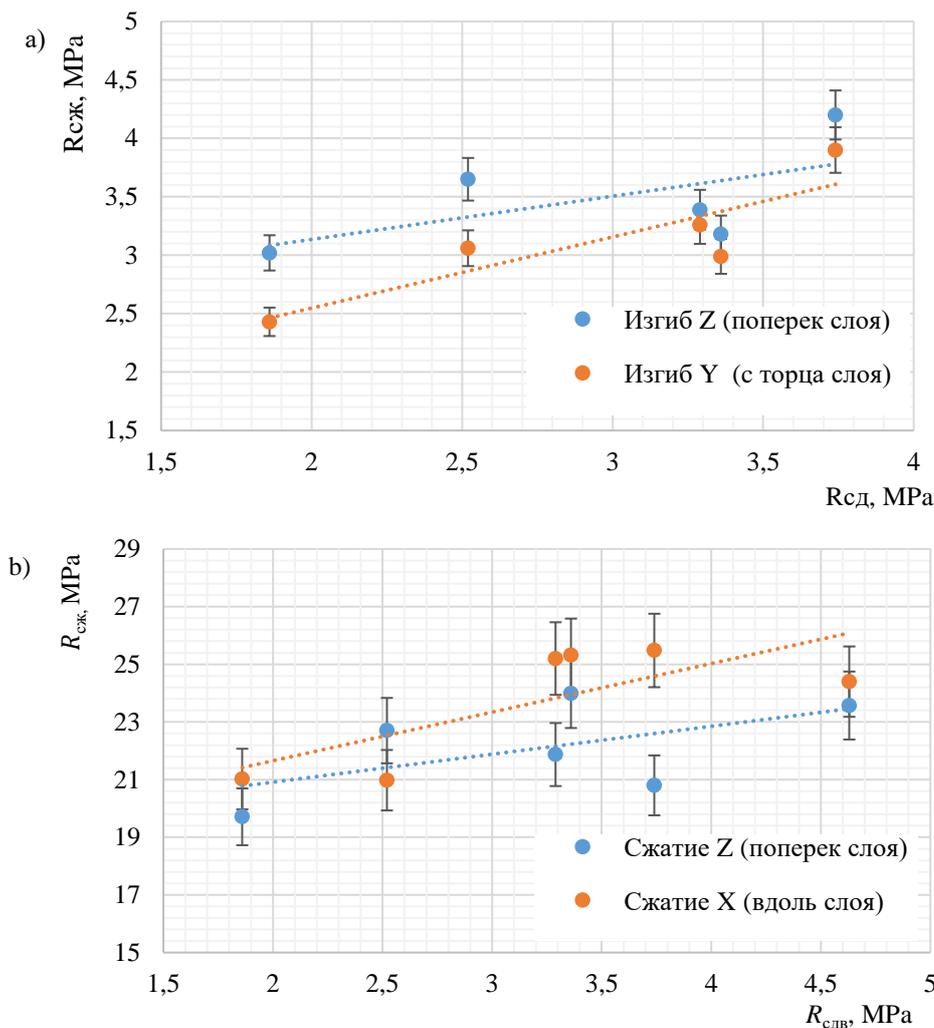


Рис. 9. Зависимость показателей прочности 3D-печатного композита от прочности сцепления слоев (а) при изгибе, (б) при сжатии

Fig. 9. Dependence of the 3D-printed composite strength on the layer adhesion strength (a) under bending, (b) under compression

Зависимость прочности сцепления слоёв 3D-печатного композита (по показателю прочности на сдвиг, рис. 8) от пластической прочности смеси имеет параболический характер, пик значений прочности сцепления слоёв ($R_{сдв} = 3,74$ МПа) достигается в точке, соответствующей $R_{пл} = 1,0$ кПа. Затем происходит спад прочности сцепления слоёв до 1,8–2 МПа.

Следует подчеркнуть, что критическим показателем, определяющим изменение всех прочностных характеристик 3D-печатных слоистых композитов, является прочность сцепления слоёв как фактор обеспечения совместной работы слоистой структуры материала под нагрузкой. Установлено, что прочность при сдвиге, принятая как показатель оценки прочности сцепления, снижается в 2 раза при увеличении значений $R_{пл}$ в заданном технологическом диапазоне. Ввиду того что при изготовлении цементная смесь имела некую вариативность показателя пластичности, получаем разброс значений, из которого можно выделить характерные 3 точки для показателя пластичности: это 0,9, 1,75 и 2,65, вокруг которых и формируется множество точек. Стоит отметить, что аппроксимирующая линия на графиках не выходит за 5 %-ю погрешность каждого полученного значения.

Поэтому закономерно, что все прочностные характеристики 3D-печатных слоистых композитов при всех схемах нагружения снижаются с увеличением $R_{пл}$ смеси и соответствующем уменьшении прочности сцепления слоёв (рис. 9). В исследованном диапазоне варьирования прочность при сжатии вдоль слоёв (по X) уменьшилась на 16,2 % (с 25,2 до 21,1 МПа),

поперёк слоёв (по Z) – 9,8 % (с 21,9 до 19,7 МПа), прочность при изгибе поперёк слоёв (по Z) – на 33,2 % (с 4,2 до 3,01 МПа), при изгибе вдоль слоёв (по Y) – на 25,4 % (с 3,26 до 2,43 МПа).

Прочность сцепления слоёв оказывает значительное влияние на характер разрушения и прочность материала, особенно при сжатии вдоль слоёв.

Наименьшее влияние прочность сцепления слоёв оказывает на прочность призм, испытанных на сжатие поперёк направления укладки слоёв. Это обусловлено характером разрушения под нагрузкой (рис. 10а, сжатие по оси Z), при испытаниях каждый вышележащий слой давит на последующий, а граница слоёв в данном случае испытывает преимущественно сжимающие напряжения. При сжатии образцов параллельно слоям (рис. 10б, сжатие по оси Y) разрушение происходит вдоль границы слоёв, поэтому прочность их сцепления оказывает в два раза более существенное влияние на прочность слоистого композита.

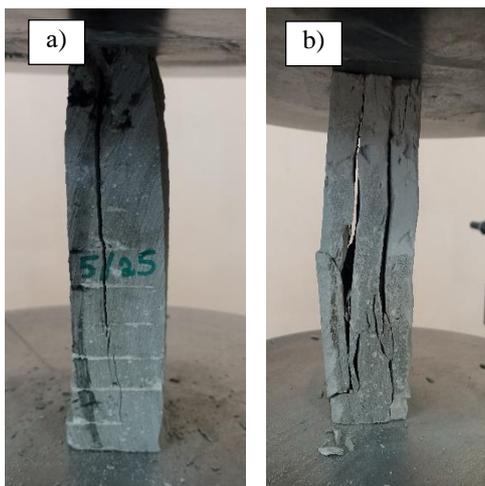


Рис. 10. Разрушения образцов-призм при испытаниях на осевое сжатие по осям Z (a) и Y(b)

Fig. 10. Failures of prism specimens during axial compression tests along the Z (a) and Y (b) axes

При испытаниях на изгиб нагрузка распределяется неравномерно (рис. 11). Верхняя часть материала подвергается сжатию, нижняя – растяжению, а нейтральная ось находится посередине и практически не испытывает нагрузки. Если сцепление слоёв плохое, то эти слои могут начать отслаиваться от основного массива материала. Особенно это заметно при испытании образцов перпендикулярно границе слоёв, что, в свою очередь, приводит к снижению общей прочности при изгибе. Когда материал изгибается вдоль границы слоёв, нагрузка передаётся через все слои одновременно. Если сцепление между слоями хорошее, то каждый слой будет поддерживать соседние, равномерно распределяя напряжение. В строительной 3D-печати это особенно важно, так как каждый новый слой должен надёжно соединяться с предыдущим, чтобы обеспечить целостность конструкции.

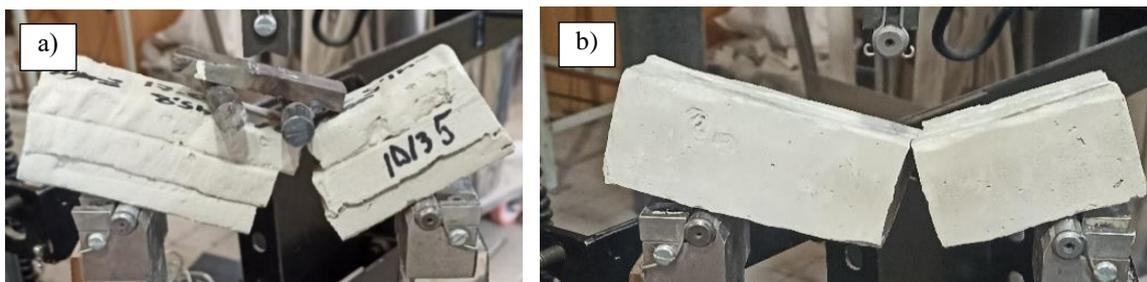


Рис. 11. Разрушения образцов-призм при испытаниях на осевое сжатие по осям Z(a) и Y(b)

Fig. 11. Failures of prism specimens during axial compression tests along the Z(a) and Y(b) axes

Таким образом, можно утверждать, что снижение прочности сцепления слоёв приводит к снижению прочности композита в целом, то есть потенциал прочности материала слоя не реализуется в слоистом печатном композите. При этом условием обеспечения необходимой прочности сцепления слоёв является показатель пластической прочности смеси, который должен находиться в диапазоне 0,8–1,8 кПа.

Заключение

Обоснован критерий оценки, разработан и апробирован метод и прибор оперативного контроля технологических характеристик смеси для 3D-печати. В качестве критерия оценки принят показатель пластической прочности, метод измерения которого основан на определении нагрузки, необходимой для погружения металлического конуса с заданным углом при вершине в смесь на фиксируемую глубину конуса. Апробирован прибор оперативного контроля пластичности – конический пластометр авторской конструкции. Доказана возможность его использования для контроля качества смеси во всём технологически допустимом диапазоне условий.

Установлен диапазон значений пластической прочности смеси для 3D-печати, составивший 0,8–2,8 кПа, при котором обеспечивается устойчивость 3D-печатных элементов и бездефектность поверхности печатных слоёв.

Установлено, что прочностные характеристики слоистых 3D-печатных композитов зависят от прочности сцепления слоёв. При этом наиболее существенно от данной характеристики зависят показатели прочности при изгибе. Прочность сцепления слоёв критически зависит от технологических характеристик смеси, оцененных по показателю пластической прочности, и снижается в 2 раза при увеличении значений $R_{пл}$ в заданном технологическом диапазоне. Установлен диапазон значений пластической прочности смеси 0,8–1,8 кПа по критерию обеспечения прочности слоистого 3D-печатного композита.

Развитие исследований будет заключаться в применении полученных данных для моделирования и управления технологическим процессом 3D-печати.

Благодарности

Выражаем благодарность нашему научному руководителю доктору технических наук Славчевой Галине Станиславовне за руководство исследованиями и помощь при подготовке статьи.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

П.Ю. Юров, Д.Р. Каракчи-Огли – постановка цели и задач исследования, анализ и обобщение результатов экспериментов, проведение экспериментальных исследований, систематизация и описание результатов.

P.Yu. Yurov, D.R. Karakchi-Ogli – setting the goal and objectives of the study, analysis and generalization of the experimental results, conducting experimental studies, systematization and description of the results.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., et al. Digital concrete: opportunities and challenges // RILEM Technical Letters. 2016. Vol. 1. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
2. Perrot A. Impression 3D du béton: État de l'art et challenges de la révolution de la construction digitale. France: ISTE Group, 2019. 160 p. (In Fr.).
3. Roussel N., Richard B., Nicolas D., Ivanova I., Kolawole J.T., et al. Assessing the fresh properties of printable cementbased materials: high potential tests for quality control // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 158. № 106836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106836>

4. 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*. 2024. Vol. 17. № 100344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100344>
5. Roussel N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35(9). P. 1656–1664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.001>
6. Mohammad A M., Masoud H., Ammar Y. Use of the chemical and mineral admixtures to tailor the rheology and the green strength of 3D printing cementitious mixtures // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC – 2020)*, Eindhoven, The Netherlands, 6–9 July 2020. Switzerland: RILEM Bookseries, 2020. P. 73–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_8
7. Perrot A., Rängeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques // *Materials and Structures*. 2016. № 49. P. 1213–1220. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
8. Placzek, G., Schwerdtner P. Concrete additive manufacturing in construction: integration based on component-related fabrication strategies // *Buildings*. 2023. Vol. 13(7). № 1769. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071769>
9. Sibel K., Ozan E.A., Tayfun Y., Gizem B.G., Sedat E., et al. Design of energy-efficient white portland cement mortars for digital fabrication // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC – 2020)*, Eindhoven, The Netherlands, 6–9 July 2020. Switzerland: RILEM Bookseries, 2020. P. 64–72. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_7
10. Shahmirzadi M.R., Gholampour A., Kashani A., Ngo T.D. Shrinkage behavior of cementitious 3D printing materials: effect of temperature and relative humidity // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 124. № 104238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104238>
11. Özalp F., Yilmaz H.D. Fresh and hardened properties of 3D high-strength printing concrete and its recent applications // *Iranian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 44. P. 319–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00370-4>
12. Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. P. 281–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>
13. Panda B., Noor Mohamed N.A., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J., Šavija B. The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete // *Materials*. 2019. Vol. 12(13). № 2149. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
14. Wolfs R., Bos F., Salet T. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119. P. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
15. Hou Z.Y., Zhang Y., Zhang C., Chen Y.D., Chen C., Zhang Y.M., Zhang Y.S. Experimental methods for the mechanical properties of 3D printed concrete // *Journal of Concrete and Cement Products*. 2020. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.54097/hset.v10i.1227>
16. Патент № 2729283 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати: № 2019133428; заявл. 21.10.2019; опубл. 05.08.2020 / Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бритвина Е.А. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».
17. Юров П.Ю. Обоснование показателя и способа контроля технологичности смеси как критерия регулирования процесса 3D-печати // *Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии: сборник трудов V международной научно-технической конференции*, ВлГУ, 23–25 апреля 2024 г. Владимир: АРКАИМ, 2024. С. 264–272.
18. Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 202. P. 770–783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
19. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205. P. 586–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
20. Bong S.H., Xia M., Nematollahi B., Shi C. Ambient temperature cured ‘just-add-water’ geopolymer for 3D concrete printing applications // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 121. № 104060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104060>

REFERENCES

1. Wolfs R., Bos F., Salet T. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 119, pp. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
2. Perrot A. Impression 3D du béton: État de l'art et challenges de la révolution de la construction digitale. France: ISTE Group, 2019. 160 p. (In Fr.).
3. Roussel N., Richard B., Nicolas D., Ivanova I., Kolawole J.T., et al. Assessing the fresh properties of printable cementbased materials: high potential tests for quality control. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 158, no. 106836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106836>
4. 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*, 2024, vol. 17, no. 100344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100344>
5. Hou Z.Y., Zhang Y., Zhang C., Chen Y.D., Chen C., Zhang Y.M., Zhang Y.S., Experimental methods for the mechanical properties of 3D printed concrete. *Journal of Concrete and Cement Products*, 2020, vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.54097/hset.v10i.1227>
6. Mohammad A M., Masoud H., Ammar Y. Use of the chemical and mineral admixtures to tailor the rheology and the green strength of 3D printing cementitious mixtures // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC – 2020)*, Eindhoven, The Netherlands, 6–9 July 2020. Switzerland: RILEM Bookseries, 2020. P. 73–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_8
7. Perrot A., Rängeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 2016, no. 49, pp. 1213–1220. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
8. Placzek G., Schwerdtner P. Concrete additive manufacturing in construction: integration based on component-related fabrication strategies. *Buildings*, 2023, vol. 13(7), p. 1769. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071769>
9. Sibel K., Ozan E.A., Tayfun Y., Gizem B.G., Sedat E., et al. Design of energy-efficient white portland cement mortars for digital fabrication. *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC – 2020)*, Eindhoven, The Netherlands, 6–9 July 2020. Switzerland: RILEM Bookseries, 2020. P. 64–72. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_7
10. Shahmirzadi M.R., Gholampour A., Kashani A., Ngo T.D. Shrinkage behavior of cementitious 3D printing materials: effect of temperature and relative humidity. *Cement and Concrete Composites*, 2021, vol. 124, no. 104238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104238>
11. Özalp F., Yilmaz H.D. Fresh and hardened properties of 3D high-strength printing concrete and its recent applications. *Iranian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 44, pp. 319–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00370-4>
12. Panda B., Noor Mohamed N.A., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J., Šavija B. The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. *Materials*, 2019, vol. 12(13), no. 2149. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
13. Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J. Additive manufacturing of geopolymers for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 167, pp. 281–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>
14. Wolfs R., Bos F., Salet T. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 119, pp. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
15. Roussel N., Richard B., Nicolas D., Ivanova I., Kolawole J.T., et al. Assessing the fresh properties of printable cementbased materials: high potential tests for quality control. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 158, no. 106836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106836>
16. Patent no. 2729283 C1 Russian Federation, IPC C04B 28/04. A two-phase cement-based mixture for composites in 3D construction printing technology: no. 2019133428: application no. 10/21/2019: published 08/05/2020 / Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Britvina E.A. [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University". (In Russ.).
17. Yurov P.Yu. Substantiation of the indicator and method of controlling the manufacturability of the mixture as a criterion for regulating the 3D printing process. *International Conference on Physics of*

- Materials, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE–2024): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference, VISU, April 23–25, 2024.* Vladimir: ARKAIM, 2024. P. 264–272. (In Russ.).
18. Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 202, pp. 770–783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
 19. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 205, pp. 586–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
 20. Bong S.H., Xia M., Nematollahi B., Shi C. Ambient temperature cured ‘just-add-water’ geopolymer for 3D concrete printing applications. *Cement and Concrete Composites*, 2021, vol. 121, no. 104060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104060>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юров Павел Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация).

✉ yurov.py@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3899-7964>

Pavel Yu. Yurov, Postgraduate Student, Junior Researcher, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russian Federation).

Каракчи-Огли Давут Ресулович – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация).

✉ karakchiogli.david@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3655-0859>

Davut R. Karakchi-Ogli, Junior Researcher, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 24.01.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 05.03.2025.

Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.