



Research Article











Received: December 17, 2025

Accepted: January 4, 2025

Published: February 15, 2026

ISSN 2304-6295

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing

Kotova, Kristina Sergeevna^{1*}  
Shvedova, Maria Aleksandrovna¹  
Yurov, Pavel Yuryevich¹  
Glukhov, Sergey Alekseevich¹  
Ovcharov, Ruslan Romanovich¹  

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation; kottova-k@yandex.ru (K.K.S.); marishwedowa@mail.ru (S.M.A.); yurov.py@yandex.ru (Y.P.Y.); serglukhov2001@gmail.com (G.S.A.); ruslan.romanovich2006@mail.ru (O.R.R.)

Correspondence:* email kottova-k@yandex.ru; contact phone [+79191850584](tel:+79191850584)

Keywords:

Translucent 3D printed composites; Photoluminescent powders; Decorative products

Abstract:

The object of research is a 3D-printable decorative concrete with an addition of photoluminescent powder. This work aims to obtain cement composite mixtures with photoluminescent properties for construction 3D printing with specified technological properties by varying their component composition in terms of the type of cement matrix, the type of cement, and the dispersion of the photoluminescent powder. **Method.** The technological characteristics of the resulting mixtures were determined using compression rheometry. The kinetics of the mixtures' setting was controlled by the plastic strength indicator, which was determined using a conical plastometer of the author's design. The fluidity of the mixtures was evaluated by the diameter of the mixture flow using the standard method of mechanical creep using the Hegemann cone. The criteria for the plasticity and shape stability of the studied mixtures were determined based on the results of compression tests conducted at a constant deformation rate and a constant loading rate. **Results.** The dependence of the setting processes of the studied mixtures on the type of cement matrix (micro-grained, fine-grained), the type of cement used (white, gray), and the dispersion of the photoluminescent powder has been established. It has been established that the setting processes are more intense in micro-grained systems with limestone flour. At the same time, systems with white cement have higher values of plastic strength and lower values of the spread diameter systems with gray cement, regardless of the type of filler and aggregate. All the studied systems exhibit an increase in plastic strength when photoluminescent powders are added, regardless of the size of the powder particles. According to the obtained values of the criteria characteristics of plasticity and form-stability, all the studied systems are suitable for the 3D-printing process. However, mixtures with the addition of photoluminescent powder PLP2 do not meet the requirements of the 3D-printing process in terms of the preservation of properties over time, as they are characterized by a rapid increase in plastic strength over time, and mixtures based on gray cement do not meet the requirements of decorative properties. Taking this into account, it is recommended to use cement mixtures based on white cement with quartz sand and an additive of photoluminescent powder with a particle size of no more than 35 microns as cement matrices for creating small architectural forms for decorative purposes.

1 Introduction

Существует глобальная проблема формирования комфортной городской среды, признанная на государственном уровне [1]. Она включает в себя в качестве составной части проблемы

Kotova, K.; Shvedova, M.; Yurov, P.; Glukhov, S.; Ovcharov, R.

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing; 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 121 Article No 12105. doi: 10.4123/CUBS.121.5



благоустройства и качественное изменение облика городских пространств и придомовых территорий, неотъемлемой частью интерьера которых являются малые архитектурные формы (МАФ) [2]. Производство МАФ как правило осуществляется из мелкозернистого бетона по литьевой технологии [3]. В связи с этим, типовые МАФ однообразны, их номенклатура ограничена, с их использованием невозможно создание пространств с выраженной идентичностью. Расширение номенклатуры и изменение дизайна МАФ, производимых по традиционным технологиям, требует больших затрат, так как связано с необходимостью переоснащения производственных линий под каждую новую номенклатуру.

Одним из решений данной проблемы может быть использование технологии строительной 3D-печати для создания различных декоративных объектов, к которым можно отнести МАФ, элементы ландшафтного дизайна, декора фасадов, уличного освещения и т.п. Гибкость и универсальность технологии, автоматизация процессов, возможность создания пустотелых объектов оригинальной геометрической формы определяют возможность изготовления на одном и том же оборудовании широкой номенклатуры изделий, что позволяет сократить трудоемкость и материальные затраты на производство того или иного изделия [4], [5].

В связи с этим, в последнее десятилетие актуальным направлением является получение и изучение новых строительных материалов, одновременно обладающих декоративными эффектами и технологическими характеристиками, необходимыми для успешной реализации процесса 3D-печати. К таким материалам можно отнести архитектурные цементные композиты, декоративные свойства которых достигаются различными способами, в частности, объемным окрашиванием цементной матрицы различными пигментами или имитацией структуры природного камня за счет применения наполнителей и заполнителей различного состава и дисперсности [6].

Оригинальным способом обеспечения декоративных свойств цементных композитов является создание оптических эффектов. Например, светопрозрачности за счет использования оптически прозрачных элементов, определенным образом встраиваемых в структуру цементного композита или длительности и яркости послесвечения за счет использования фотолюминесцентных порошков. Комбинирование указанных технологических подходов и методов, например, «окрашивание – создание текстуры», «окрашивание – оптический эффект послесвечения», «окрашивание – оптические эффекты послесвечения и светопропускания» позволит получить смеси с повышенными декоративными свойствами для строительной 3D-печати и уникальные изделия на их основе, которые могут использоваться как элементы средового дизайна (утилитарные и декоративные МАФ), элементы декора фасадов зданий (навесные и нанесенные на поверхность стеновых панелей).

Идея создания светопрозрачных цементных композитов была выдвинута и реализована еще в 2001 г. венгерским архитектором А. Losonzi [7]-[9]. Предложенный им способ получения светопрозрачных цементных композитов предполагает использование оптически прозрачных элементов (волокон, пластинок, сфер), которые укладываются вручную или закрепляются в специальных формах, а затем заливаются подвижной смесью. Полученные таким образом изделия (крыши, стены, балки, перегородки, блоки и т.п.) позволяют увеличить уровень естественного освещения в зданиях и сооружениях, а малые архитектурные формы отличаются оригинальным дизайном и художественной выразительностью. Однако, такой способ создания конструкций и изделий не получил широкого распространения из-за своей трудоемкости и значительной стоимости получаемых изделий [10], [11].

При получении светопрозрачных цементных композитов по технологии 3D-печати предполагается автоматическая укладка оптически прозрачных элементов (оптического волокна) непосредственно в процессе печати, что позволит снизить стоимость изделий за счет снижения трудоемкости процесса их получения. Дополнительные декоративные свойства получаемого изделия можно обеспечить за счет введения в состав цементной матрицы фотолюминесцентного порошка, правильный подбор вида и дозировки которого позволит получить изделия с заданными значениями яркости и длительности послесвечения. При этом, для успешной реализации процесса 3D-печати важно обеспечить цементной матрице технологические свойства (пластичность, формоустойчивость, определенное время схватывания) и их сохранность во времени.

Вопросы получения и исследования свойств фотолюминесцентных композиционных материалов на основе цемента для получения малых архитектурных форм рассматриваются в работах российских ученых из БГТУ им. В.Г. Шухова [12]-[14]. Авторами разработан состав

Kotova, K.; Shvedova, M.; Yurov, P.; Glukhov, S.; Ovcharov, R.

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing; 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 121 Article No 12105. doi: 10.4123/CUBS.121.5



цементного композита с заданными декоративными и физико-механическими свойствами (класс по прочности – В50, маркой по морозостойкости – F300, водопоглощение не более 4 % по массе; начальная яркость послесвечения – 2.95 кд/м², длительность послесвечения – до 8 ч, однородность послесвечения поверхности бетона не менее 65 %). Также в их научных работах предложена методика комплексной оценки декоративности цементных композитов по показателям цвета, текстуры и фактуры, а также разработан способ получения изделий из декоративного цементного композита с помощью вибролитьевой технологии.

Анализ международных исследований позволил установить, что цементные композиты с фотолюминесцентными порошками преимущественно используются для получения объектов благоустройства дорог и придорожных территорий – тротуаров [15]-[17], бордюров [18], [19] и ограничителей и специальных покрытий для них [20], [21] с целью улучшения их видимости в темное время суток или при плохих погодных условиях. Для исследований используются фотолюминесцентные порошки на основе алюмината стронция, что обусловлено их длительным временем послесвечения, химической устойчивостью к действию компонентов цементного камня, устойчивостью к воздействию агрессивных факторов внешней среды, возможностью непосредственного участия в процессах гидратации и набора прочности цементного камня. Составы цементных композиционных смесей с фотолюминесцентными свойствами, представленные в рассмотренных выше работах, направлены на получение изделий с применением традиционных литьевых и вибролитьевых технологий, которые предполагают использование высоких значений водоцементных (В/Ц) отношений. Главным приоритетом существующих исследований является подбор компонентных составов смесей по критериям фотолюминесцентных свойств (яркости и длительности послесвечения). Однако отсутствует опыт применения смесей с фотолюминесцентными порошками для изготовления изделий с помощью аддитивных технологий. При этом ранее установлено, что существенное влияние на пластичность и формоустойчивость смесей для 3D-печати оказывает состав дисперсной фазы и дисперсионной среды [22]. Введение фотолюминесцентных порошков в состав цементной матрицы увеличит концентрацию дисперсной фазы, что может повлиять на технологические свойства смеси и их сохранность во времени. Таким образом, не изучен вопрос влияния вида и дисперсности фотолюминесцентных порошков на технологические свойства цементных композиционных смесей для 3D-печати, принципиально отличающиеся от свойств бетонных смесей для традиционных строительных технологий.

В связи с этим, цель работы состояла в определении требований к составам цементных смесей для строительной 3D-печати с регулируемым фотолюминесцентными и заданными технологическими свойствами. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

- 1) провести оценку критериальных характеристик пластичности и формоустойчивости композиционных смесей для строительной 3D-печати, модифицированных фотолюминесцентными порошками;
- 2) изучить влияние дисперсности фотолюминесцентного порошка в зависимости от вида используемого цемента и вида матрицы на кинетику схватывания исследуемых смесей;
- 3) сформулировать рекомендации к компонентному составу цементных матриц, обеспечивающих достижение технологических свойств, необходимых, для осуществления процесса 3D-печати (время схватывания, пластичность, формоустойчивость).

2 Materials and Methods

Экспериментальные исследования проводились на базовых, запатентованных ранее составах смесей двух видов: мелкозернистом [23], в котором в качестве заполнителя использовался кварцевый песок, и микрозернистом, в котором в качестве наполнителя использовалась известняковая мука, [24]. Для получения указанных видов смесей использовались следующие компоненты:

- рядовой цемент (С1) марки СЕМ I 42.5R (производитель АО «ЦЕМПОС», г. Старый Оскол, Белгородская обл., Россия) по ГОСТ 31108-2020 (Russian National State Standard 31108-2020 «Common cements. Specifications»), (С₃С – 62 %, С₂С – 13 %, С₃А – 7.5 %, С₄АФ – 11.5 %);
- белый цемент (С2) марки DecoCEM 500, без минеральных добавок 1-го сорта (производитель «ЦЕМЕНТУМ», (г. Воскресенск, Г.О. Коломна, Россия), по ГОСТ 965-89 (Russian



National State Standard «Portland cements, white. Specifications»), ($C_3S - 73.4\%$, $C_2S - 10.4\%$, $C_3A - 13.0\%$, $C_4AF - 0.4\%$, $CaO_{св.} - 1.6\%$);

- водопроводная вода (W), отвечающая требованиям ГОСТ 23732-2011 (Russian National State Standard 23732-2011 «Water for concrete and mortars. Specifications»);

- суперпластификатор (SP), порошок на основе поликарбоксилатных эфиров марки Pulmix 4033 (производитель «ПОЛИПЛАСТ», г. Москва, Россия);

- метакаолин (MKL) марки ВМК-45 (производитель ООО «Синерго», г. Магнитогорск, Россия) по ТУ 23.99.19-004-34556001-2017 ($Al_2O_3 - 42\%$, $SiO_2 - 53\%$);

- кварцевый песок (S) с модулем крупности $M_k \leq 1.25$, отвечающий требованиям ГОСТ 8736-2014 (Russian National State Standard 8736-2014 «Sand for construction works. Specifications»);

- известняковая мука (LF) с содержанием $CaCO_3$ не менее 95% (производитель «Воронежский завод минеральных порошков», г. Воронеж, Россия), по ГОСТ 26826-86 (Russian National State Standard 32761-2014 «Automobile roads of general use. Mineral powder. Technical requirements»).

Для придания цементным матрицам оптических эффектов, т.е. яркости и длительности послесвечения, использовали фотолюминесцентные порошки на основе алюмината стронция желто-зеленого свечения, отличающиеся размером частиц, интенсивностью и длительностью послесвечения (табл. 1):

- фотолюминесцентный порошок марки МНГ-6DW (PLP1) (производитель «Zhejiang MinHui Luminous Technology Co., Ltd», г. Ланси, Чжэцзян, КНР);

- фотолюминесцентный порошок марки ЛДП-2МА(100)П (PLP2) (ООО ПТК Спецматериалы, г. Москва, Россия).

На основании предварительно проведенного эксперимента по определению яркости послесвечения, а также принимая во внимание результаты, полученные другими учеными [12]-[14], экономическую целесообразность, была подобрана рациональная дозировка фотолюминесцентных порошков, которая составила 10% от массы цемента.

Таблица 1. Характеристики фотолюминесцентных порошков, используемых для обеспечения декоративных свойств

Table 1. Characteristics of photoluminescent powders used to provide decorative properties

Обозначение	Марка	Размер частиц, мкм	Интенсивность свечения, мин ($мКд/м^2 \pm 5\%$)		Длительность свечения, ч
			10	60	
PLP1	МНГ-6DW	25-35	450	65	12
PLP2	ЛДП-2МА(100)П	80-100	460	39	10

Исследовано 12 составов, факторное пространство эксперимента представлено в таблице 2. Цементные композиционные смеси получали в лопастном смесителе путем перемешивания сухих компонентов с их последующим затворением водой. В качестве эталонных были приняты композиционные составы без добавления фотолюминесцентных порошков. Значения водоцементных (В/Ц) отношений исследуемых смесей подбирались на основании значений пластической прочности по сопротивлению пенетрации ($0.2-1.6$ кПа) и средних диаметров расплыва ($160-190$ мм), полученных для свежеприготовленных смесей в начальное время измерений (0 минут) [25], [26]. Для систем, с фотолюминесцентными порошками значения В/Ц-отношений увеличивали для обеспечения необходимых вязко-пластичных свойств.

Для оценки пластичности и формоустойчивости исследуемых смесей проводили сдавливающие тесты свежееотформованных образцов-цилиндров, радиус которых равен их высоте ($R = h_0 = 25$ мм), между двумя параллельными пластинами. При этом реализуются два варианта испытаний: 1) сдавливание с постоянной скоростью деформирования; 2) сдавливание с постоянной скоростью нагружения. Сдавливанию с постоянной скоростью деформирования проводили согласно методике N. Roussel'a [27], [28], при этом скорость сдавливания свежееотформованных образцов принималась постоянной и составляла 5 мм/с. Полученные в процессе испытаний кривые «нагрузка P – перемещение Δ » интерпретировались в виде кривых зависимости приведенной нагрузки F^* (соотношение 1) от относительного изменения высоты образца h_i/R . Для точек перегиба рассчитывалась величина $K_i(l)$ согласно соотношению 2:

$$F_i^* = \frac{Ph_i}{\pi R^2}, \quad (1)$$

$$K_i\left(\frac{h}{R}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} F^* \quad (2)$$

Далее проводились испытания при постоянной скорости нагружения 0.5 Н/с согласно методике А. Perrot'a [29]. Испытания проводились непосредственно после формования образцов. В процессе опыта фиксировались кривые «нагрузка Р – перемещение Δ» и «перемещение Δ – время t». Численные значения структурной прочности, пластической прочности и пластических деформаций исследуемых систем рассчитывали согласно соотношению 3 в точках, соответствующих началу деформирования и началу трещинообразования [22, 30]:

$$\sigma = \frac{P}{\pi R^2} \quad (3)$$

В результате проведения сдвливающих тестов были получены основные критериальные характеристики пластичности и формоустойчивости – оценка предела пластичности $K_i(l)$, структурная прочность σ_0 в момент начала деформирования (отвечает за способность системы сопротивляться деформированию при нагружении), пластическая прочность $\sigma_{пл}$ и величина относительных пластических деформаций $\Delta_{пл}$ в момент начала трещинообразования (характеризуют способность системы деформироваться без разрушения) [22], [30].

Основываясь на ранее полученных собственных результатах [25], [30] и результатах коллег [26] оптимальными считали те системы, которые в начальный момент измерений (0 минут) характеризовались значениями пластической прочности по сопротивлению пенетрации 0.20-1.60 кПа, значениями диаметра расплыва смесей 160-190 мм. Также учитывались значения предела пластичности $K_i(l) \approx 0.8-2.5$ кПа; значения структурной прочности $\sigma_0 \geq 0.2$ кПа; значения пластической прочности $\sigma_{пл} \geq 30$ кПа; величина относительных пластических деформаций в момент начала трещинообразования $\Delta_{пл} \leq 0.25$ мм/мм.

Таблица 2. Состав архитектурных смесей для строительной 3D-печати
Table 2. Mix design of 3D-printable architectural concrete

Cement type	Matrix type	System designation	W/C ratio	Ratio C : S, C : LF	Dosage of components, % by weight of cement		
					MKL	SP	PLP
Grey	Fine-grained (sandbased)	C1-S	0.29	1 : 1.25	2	0.2	-
		C1-S-PLP1	0.32				10
		C1-S-PLP2	0.32				10
	Micro-grained (limeflourbased)	C1-LF	0.42	1 : 1	2	0.2	-
		C1-LF-PLP1	0.45				10
		C1-LF-PLP2	0.45				10
White	Fine-grained (sandbased)	C2-S	0.35	1 : 1.25	2	0.2	-
		C2-S-PLP1	0.38				10
		C2-S-PLP2	0.38				10
	Micro-grained (limeflourbased)	C2-LF	0.51	1 : 1	2	0.2	-
		C2-LF-PLP1	0.53				10
		C2-LF-PLP2	0.53				10

Для контроля кинетики схватывания смесей использовали показатель пластической прочности. 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 (соотношение 4):

$$P_m = K_\alpha \times F / h_m^2 \quad (4)$$

где P_m – пластическая прочность, K_α – константа конуса ($K_\alpha 45^\circ = 0.416$), F – прилагаемое усилие, h_m – глубина погружения конуса (20 мм).

В исследованиях использовался пластометр авторской конструкции. В качестве исполнительного механизма принят конус пластометра конструкции МГУ с углом 45° и глубиной

Kotova, K.; Shvedova, M.; Yurov, P.; Glukhov, S.; Ovcharov, R.

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing; 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 121 Article No 12105. doi: 10.4123/CUBS.121.5



погружения конуса $h_m = 20$ мм. 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 4) и выводит максимальные значения на экран. Методика измерения и параметры ее верификации подробно изложена в работе [31].

Для определения текучести смесей также контролировали диаметр расплыва смесей (D_{cp}) стандартным методом оползания при механических воздействиях по ASTM C230 с использованием конуса Хегермана. Для этого встряхивающий столик перемещали 20 раз за 30 секунд, после чего измеряли противоположные диаметры расплыва смеси.

3 Results and Discussion

Результаты исследования пластичности и формоустойчивости (рис. 1-4) полученных смесей позволили установить значения их критериальных характеристик, которые представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения диаметров расплыва и критериальные характеристики пластичности, формоустойчивости исследуемых систем

Table 3. The values of the spreading diameter and critical characteristics for the plasticity and shape stability of the studied systems

Cement matrix type	System designation	$K_i(I)$, kPa	σ_0 , kPa	$\sigma_{pl.}$, kPa	$\Delta_{pl.}$, kPa	D_{cp} , mm		
						0 min	30 min	60 min
Fine-grained	C1-S	0.94	1.27	45.14	0.12	191.0	158.0	150.5
	C1-S-PLP1	0.53	0.21	48.79	0.13	172.0	-	-
	C1-S-PLP2	2.90	2.12	40.02	0.24	207.5	164.0	154.0
	C2-S	1.58	2.87	38.18	0.08	173.0	114.5	-
	C2-S-PLP1	1.23	1.03	37.93	0.10	157.5	140.0	133.0
	C2-S-PLP2	2.35	3.32	43.00	0.12	177.0	130.0	-
Micro-grained	C1-LF	1.72	0.87	52.02	0.16	182.0	152.0	143.5
	C1-LF-PLP1	0.79	0.16	50.78	0.13	171.0	141.0	133.5
	C1-LF-PLP2	1.79	2.76	51.46	0.15	204.5	159.0	146.0
	C2-LF	1.84	2.79	43.11	0.10	180.0	148.5	136.0
	C2-LF-PLP1	1.40	0.39	38.83	0.22	173.5	136.5	118.5
	C2-LF-PLP2	2.58	3.42	43.14	0.14	214.5	162.0	144.5

Значения критерия пластичности $K_i(I)$ всех исследуемых систем лежат в диапазоне 0.53-2.90 кПа. То есть, такие системы являются пластичными и способны к вязкопластическому течению без разрушения структуры. Причем, для всех систем, независимо от вида цементной матрицы и вида используемого цемента, можно отметить следующее. Введение фотолюминесцентного порошка PLP1 при одновременном повышении В/Ц-отношений способствует повышению пластичности систем, т.к. значение $K_i(I)$ в данных системах понижается по сравнению с эталонными системами. При введении в системы фотолюминесцентного порошка PLP2 несмотря на увеличение В/Ц-отношений, пластичность систем уменьшалась, о чем свидетельствует повышение значений $K_i(I)$ модифицированных систем по сравнению с эталонными.

Анализ значений показателей формоустойчивости (σ_0 , $\sigma_{пл.}$, $\Delta_{пл.}$) модифицированных фотолюминесцентными порошками цементных систем по сравнению с эталонными позволил установить следующие тенденции. Независимо от вида используемого цемента, структурная прочность систем с фотолюминесцентным порошком PLP1 по сравнению с эталонными системами снижается в 3-6 раз и в 5-7 раз для систем с песком и известняковой мукой, соответственно. Структурная прочность систем с фотолюминесцентным порошком PLP2, напротив, по сравнению с эталонными системами повышается в 1.1-1.6 раз и в 1.2-3.1 раз для систем с песком и известняковой мукой, соответственно.

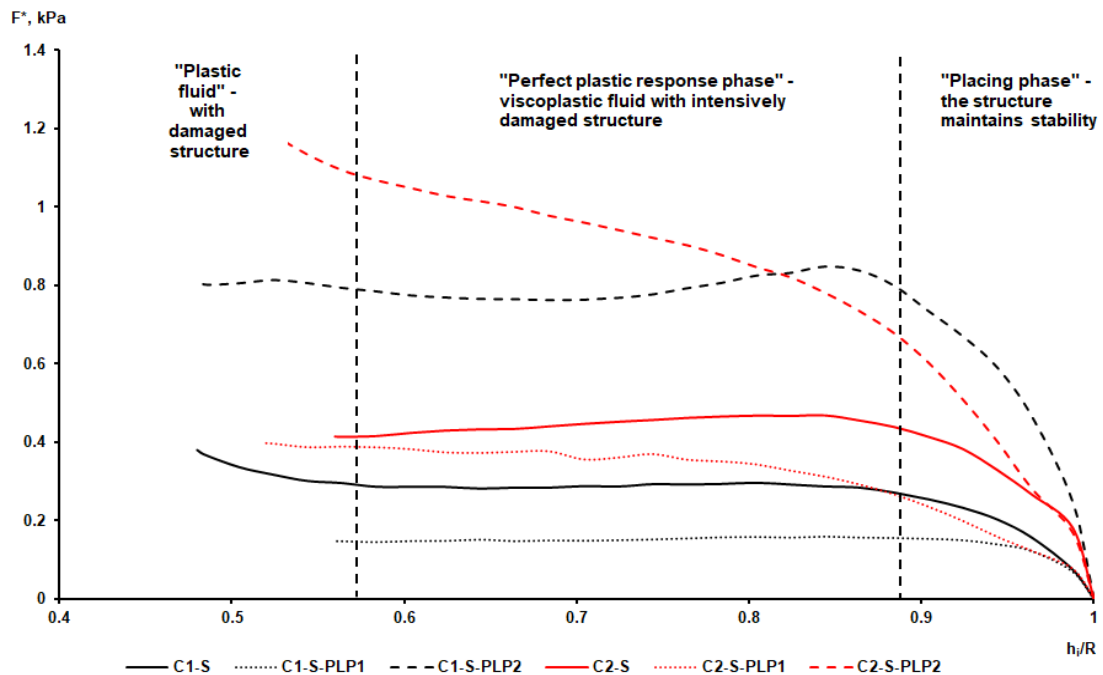


Рис. 1 – Кривые зависимости приведенной нагрузки F^* от относительного изменения высоты образца h_i/R исследуемых мелкозернистых систем с фотолюминесцентными порошками
 Fig. 1 – Curves of the dependence of the reduced load F^* on the relative change in the height of the sample h_i/R of the studied fine-grained systems with photoluminescent powders

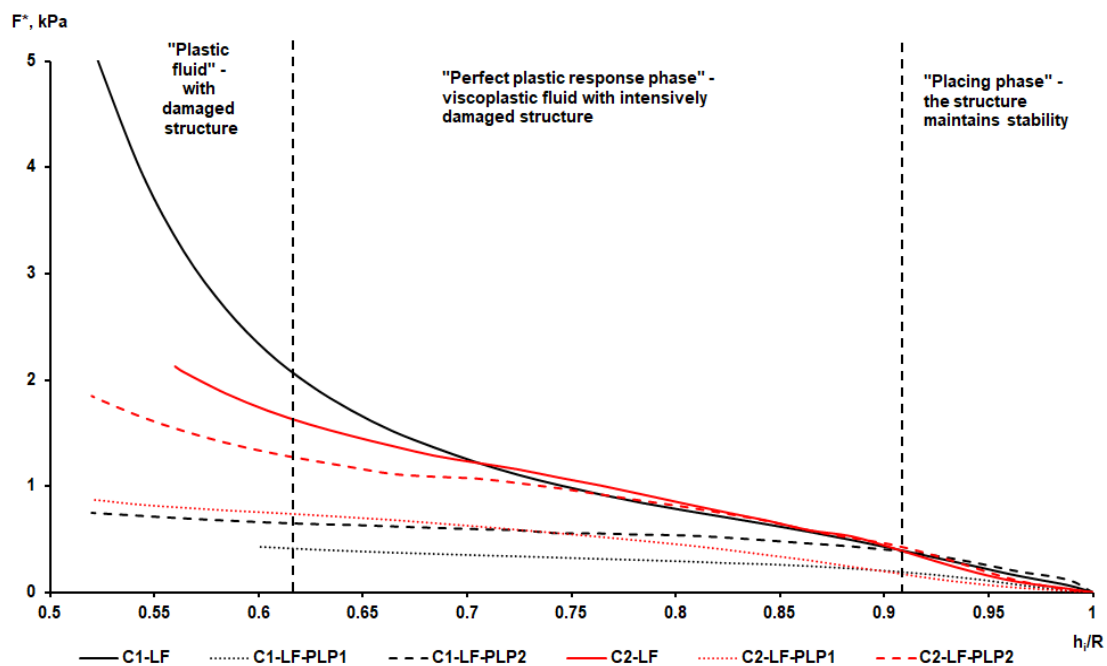
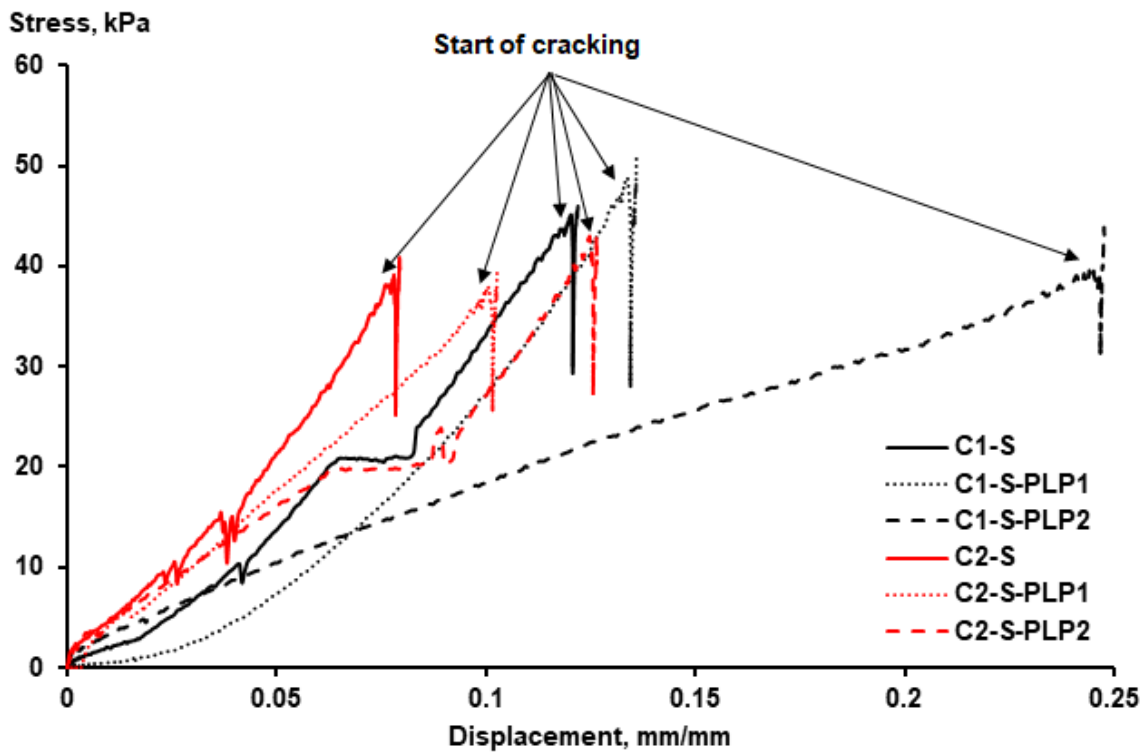
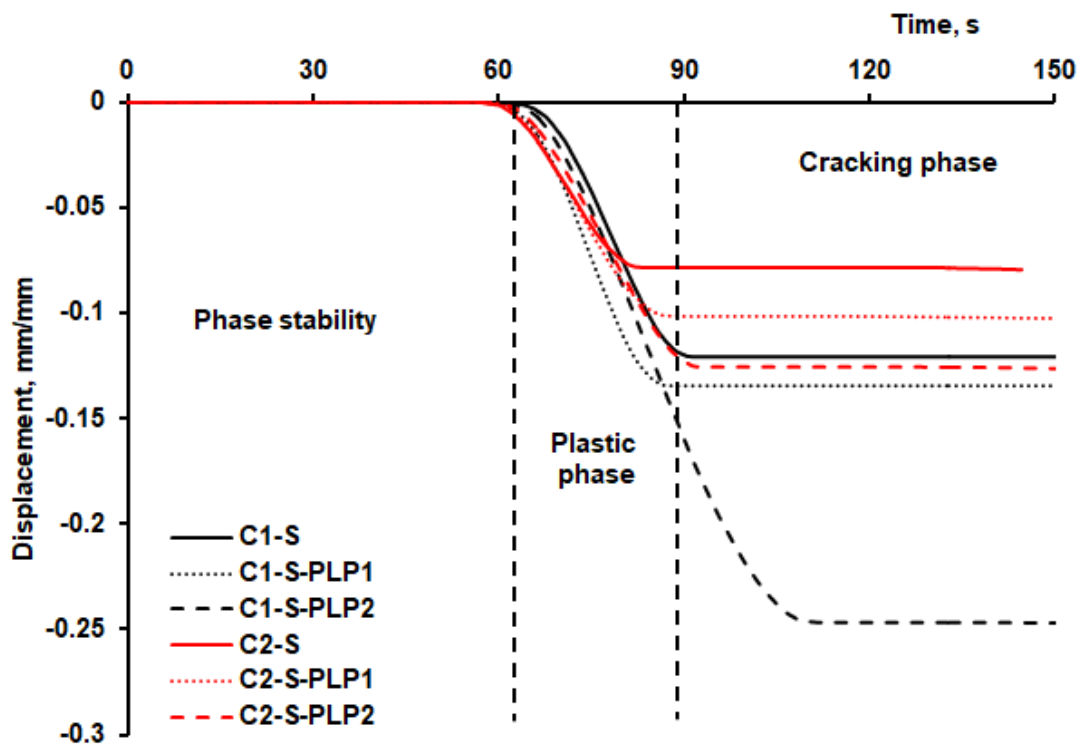


Рис. 2 – Кривые зависимости приведенной нагрузки F^* от относительного изменения высоты образца h_i/R исследуемых микрозернистых систем с фотолюминесцентными порошками;
 Fig. 2 – Curves of the dependence of the reduced load F^* on the relative change in the height of the sample h_i/R of the studied micrograined systems with photoluminescent powders

Изображения выполнены авторами статьи



a)

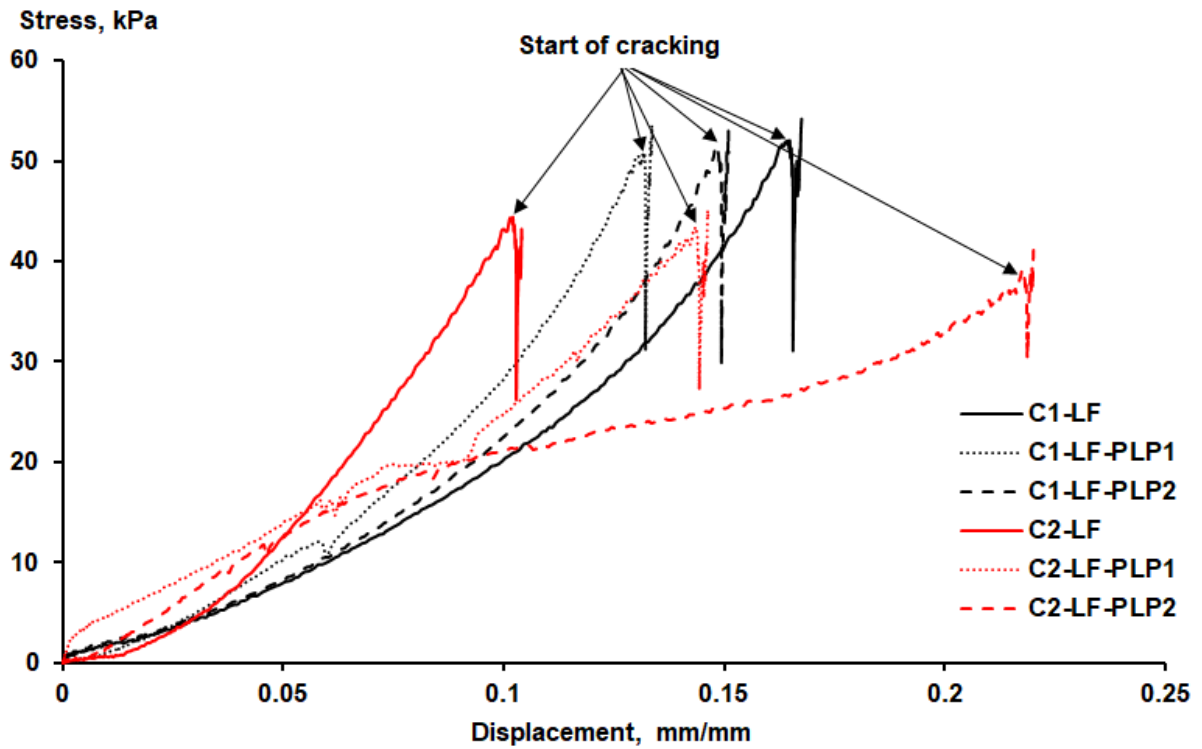


b)

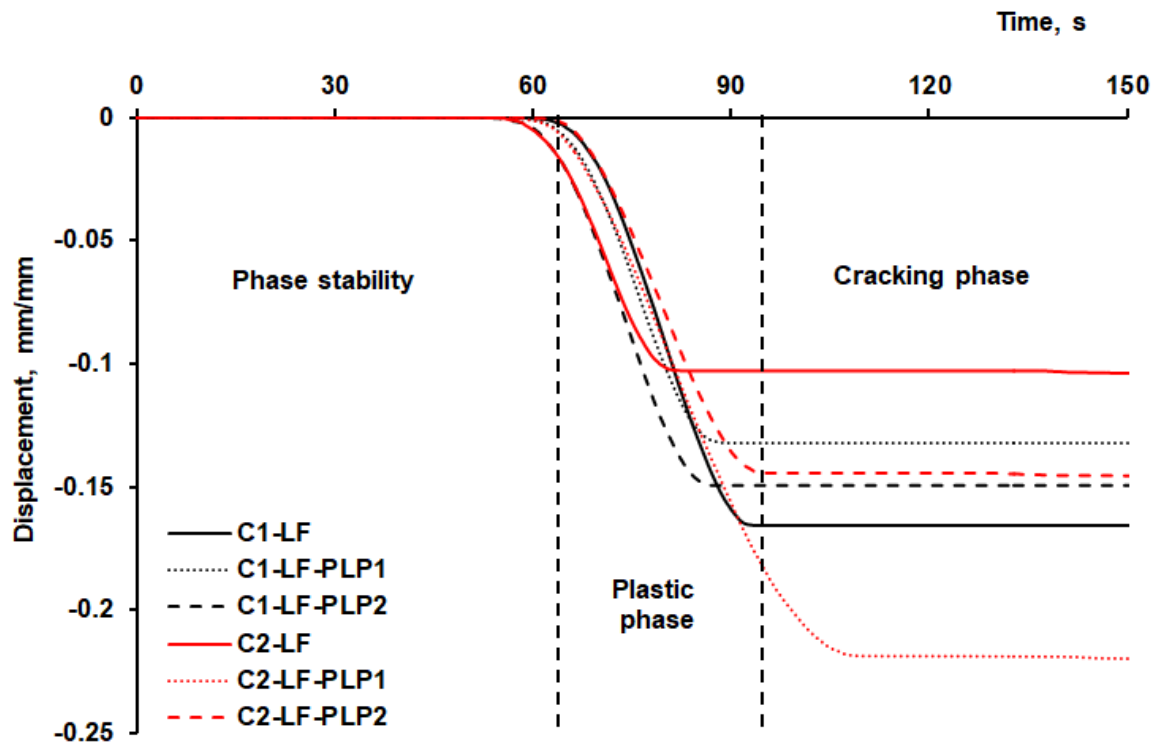
Рис. 3– Кривые зависимости нагрузки от относительного перемещения (а) и относительного перемещения от времени (б) исследуемых мелкозернистых систем с фотолюминесцентными порошками

Fig. 3 – Load-relative displacement (a) and relative displacement-time (b) curves for the studied fine-grained systems with photoluminescent powders

Изображения выполнены авторами статьи



a)



b)

Рис. 4 – Кривые зависимости нагрузки от относительного перемещения (а) и относительного перемещения от времени (б) исследуемых микрозернистых систем с фотолюминесцентными порошками

Fig. 4 – Load-relative displacement (a) and relative displacement-time (b) curves for the studied micrograined systems with photoluminescent powders

Изображения выполнены авторами статьи



При этом, значения пластической прочности и относительных пластических деформаций цементных систем, модифицированных порошками по сравнению с эталонными системами изменяются неоднозначно и принимают значения $\sigma_{пл.} = 38-48$ кПа, $\Delta_{пл.} = 0.10-0.24$ мм/мм – для мелкозернистых систем, $\sigma_{пл.} = 39-51$ кПа, $\Delta_{пл.} = 0.13-0.22$ мм/мм – для микрозернистых систем. То есть, такие системы являются формоустойчивыми и способны обеспечить укладку от 35 до 50 слоев из свежеприготовленных смесей с относительными пластическими деформациями не более 0.24 мм/мм.

Таким образом, согласно полученным значениям критериальных характеристик пластичности и формоустойчивости ($K_i(I)$, σ_0 , $\sigma_{пл.}$, $\Delta_{пл.}$), все исследуемые системы являются пригодными для осуществления процесса 3D-печати. Однако смеси с порошком PLP2 можно охарактеризовать как жесткие, что ограничивает их номенклатуру применения.

Результаты исследования кинетики набора пластической прочности представлены в таблице 4. Для сравнения полученных данных принят временной маркер 30 минут, как показатель средних значений для рассматриваемого временного интервала. При этом начальные значения пластической прочности (0 минут) для всех составов находились в пределах 0.15-0.60 кПа, что соответствует диапазону начальных значений пластической прочности, обеспечивающих процесс экструзии.

Таблица 4. Кинетика изменения пластической прочности исследуемых смесей
Table 4. Kinetics of changes in the plastic strength of the investigated mixture

Time, min	Fine-grained cement matrix					
	C1-S	C1-S-PLP1	C1-S-PLP2	C2-S	C2-S-PLP1	C2-S-PLP2
	Plasticity $P_{pl.}$, kPa					
0	0.15	0.30	0.32	0.48	0.19	0.32
5	0.30	0.75	4.20	1.88	2.33	5.52
10	0.79	1.06	12.79	2.24	4.41	11.21
15	1.19	2.17	28.71	3.27	8.19	17.14
20	1.26	2.84	39.71	4.65	11.89	23.59
30	2.24	4.29	-	8.57	16.13	35.20
40	3.06	7.45	-	12.60	24.06	-
50	2.58	8.01	-	21.81	35.69	-
60	3.18	8.25	-	28.19	-	-
Time, min	Micro-grained cement matrix					
	C1-LF	C1-LF-PLP1	C1-LF-PLP2	C2-LF	C2-LF-PLP1	C2-LF-PLP2
	Plasticity $P_{pl.}$, kPa					
0	0.26	0.32	0.57	0.40	0.28	0.51
5	0.65	1.22	2.94	2.02	0.59	2.55
10	1.07	2.65	4.15	3.44	1.18	5.00
15	1.85	2.99	5.31	5.23	1.94	7.74
20	1.84	3.34	6.42	7.60	2.08	11.15
30	3.46	5.01	9.62	11.91	3.55	21.81
40	6.28	5.11	12.35	15.26	5.33	31.73
50	8.02	6.73	16.04	21.32	7.07	53.70
60	10.25	9.41	16.07	30.26	11.03	-

Анализ полученных данных позволил установить, что начало схватывания исследуемых систем зависит от вида цементной матрицы, вида используемого цемента, но определяющим является фактор дисперсности фотолюминесцентных порошков.

В эталонных смесях с кварцевым песком, независимо от вида цемента, на протяжении всего времени исследования зафиксированы меньшие значения $P_{пл.}$, чем в системах с известняковой мукой. Это, предположительно, обусловлено тем, что песок является инертным материалом и при нормальных условиях не оказывает заметного влияния на процессы схватывания цементных систем в то время, как известняковая мука способна к частичным взаимодействиям с минералами цементного клинкера.

Вместе с этим, можно отметить, что значения пластической прочности в эталонных системах на белом цементе, независимо от вида наполнителя и заполнителя, в среднее время (через 30 минут от начала измерений) приблизительно в 3.4-3.8 раза выше, чем в системах на сером



цементе. Данный эффект, вероятно, связан с тем, что белый цемент является более активным за счет высокого содержания алитовой фазы ($C_3S - 73.4\%$).

Во всех системах с добавкой фотолюминесцентных порошков наблюдается более интенсивный прирост пластической прочности по сравнению с эталонными системами на протяжении всего времени измерений. При этом, при прочих равных условиях (вид цементной матрицы, вид используемого цемента) более высокие значения $R_{пл.}$ характерны для цементных смесей с фотолюминесцентным порошком PLP2. Мелкозернистые системы с добавкой PLP2 теряют пластичность в среднем в 2-9 раз быстрее, а микрозернистые – в 2-6 раз быстрее, чем системы эталонные. Вероятно, введение в состав систем фотолюминесцентного порошка с размером частиц 80 – 100 мкм в дозировке 10 % от массы цемента способствует созданию достаточно плотной пространственной упаковки частиц твердой фазы, что оказывает существенное влияние на их вязко-пластические свойства.

В системах с добавкой фотолюминесцентного порошка PLP1 влияние фактора размера частиц на кинетику схватывания менее выражено. Можно отметить, что, независимо от вида цемента, в микрозернистых цементных матрицах с PLP2 значения пластической прочности в 1.7-4 раза выше, чем в мелкозернистых. Наибольшая разница $R_{пл.}$ наблюдается для систем на сером цементе.

Результаты исследования кинетики набора пластической прочности коррелируют с данными, полученными при определении диаметров расплыва исследуемых смесей (табл. 3). Эталонные системы без добавки фотолюминесцентных порошков в начальный момент измерений (0 минут) являются текучими и имеют значения $D_{ср.} = 170-190$ мм.

Можно отметить, что несмотря на увеличение В/Ц, смеси с добавкой PLP2, независимо от вида цементной матрицы и вида используемого цемента, теряли текучесть и становились более жесткими по сравнению с эталонными системами, о чем свидетельствует уменьшение значений $D_{ср.}$ (157-173 мм). Смеси с добавкой PLP1 напротив становились более текучими, по сравнению с эталонными системами, диаметры их расплыва увеличивались и принимали значения от 177 до 214 мм. С течением времени (30 мин, 60 мин) средние значения диаметров расплыва как в эталонных, так и в модифицированных системах закономерно уменьшались.

Таким образом, на основании полученных значений пластической прочности $R_{пл.}$ и диаметров расплыва – показателей сохранности свойств смесей во времени, можно утверждать, что чем выше дисперсность фотолюминесцентного порошка, тем быстрее смеси теряют свои технологические свойства, необходимые для осуществления процесса 3D-печати. Независимо от вида цементной матрицы и вида используемого цемента, более высокие значения пластической прочности на протяжении всего времени измерений зафиксированы в системах с фотолюминесцентным порошком PLP2, размер частиц которого составляет 80-100 мкм. При этом, значения диаметра расплыва смесей с добавкой фотолюминесцентного порошка PLP1 с размером частиц 25-35 мкм по сравнению с эталонными системами увеличиваются, а с добавкой фотолюминесцентного порошка PLP2 с размером частиц 80-100 мкм – напротив, уменьшается. Такое поведение смесей обусловлено различной дисперсностью используемых фотолюминесцентных порошков. Фотолюминесцентный порошок PLP2, отличающийся крупным размером частиц, способствует созданию более плотной пространственной упаковки частиц и увеличению жесткости систем даже при увеличении В/Ц-отношения.

4 Conclusions

1) Установлено влияние дисперсности фотолюминесцентных порошков на критериальные характеристики пластичности и формоустойчивости 3D-печатных смесей. Полученные величины $K_i(I)$, σ_0 , $\sigma_{пл.}$, $\Delta_{пл.}$ для всех исследованных систем находятся в границах ранее установленного диапазона значений и обеспечивают их необходимые технологические свойства для осуществления бездефектного процесса 3D-печати. В тоже время, системы с добавкой фотолюминесцентного порошка с крупным размером частиц (80-100 мкм) являются более жесткими, так как обладают высокими показателями $K_i(I)$, σ_0 , и $\Delta_{пл.}$, что делает их не вполне пригодными для процесса 3D-печати.

2) Выявлено влияние дисперсности фотолюминесцентных порошков на кинетику схватывания и диаметр расплыва исследуемых смесей. Применение добавки фотолюминесцентного порошка с большим размером частиц (80-100 мкм) как в мелко-, так и в микрозернистых смесях приводит к быстрому приросту пластической прочности и уменьшению диаметра расплыва смесей во времени. Причем, в мелкозернистых смесях процессы схватывания

Kotova, K.; Shvedova, M.; Yurov, P.; Glukhov, S.; Ovcharov, R.

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing; 2026; Construction of Unique Buildings and Structures; 121 Article No 12105. doi: 10.4123/CUBS.121.5



с большим размером частиц порошка протекают более интенсивно, что ограничивает их применение в данном виде матриц. Смеси с фотолюминесцентный порошок с дисперсностью 25-35 мкм соответствуют критерию сохранности свойств независимо от вида цементной матрицы и вида цемента.

3) На основании полученных результатов для обеспечения необходимых технологических свойств смесей (пластичность, формоустойчивость) и их сохранности во времени рекомендуется при печати микрозернистыми смесями использовать фотолюминесцентные порошки с дисперсностью до 100 мкм, а мелкозернистыми – с дисперсностью до 50 мкм. При этом, для создания печатных изделий с повышенными декоративными свойствами и с целью усиления оригинальных оптических эффектов достигаемых при использовании фотолюминесцентных порошков (яркость и интенсивность послесвечения) наиболее целесообразно их введение в составы на белом цементе.

4) Дальнейшие перспективы исследований связаны с исследованием влияния дисперсности фотолюминесцентных порошков на оптические свойства (яркость и интенсивность послесвечения) и структурообразование печатных композитов.

5 Acknowledgements

Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета.

6 Fundings

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10182 «Разработка принципов создания архитектурных цементных композитов и изделий с оптическими свойствами для строительных аддитивных технологий», <https://rscf.ru/project/25-79-10182>

7 Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

1. Bakaeva, N.V., Chernyaeva, I.V., Kormina, A.A. and Starkova A.A. (2025) The evolution of human ecological consciousness and the concept of a biospherically compatible city in the issue of safety and comfort urban environment // *Urban construction and architecture. Urban Planning and Architecture*, **3(15)**, 159-169. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2025.03.19>
2. Kostyshak, M.M. and V'yugina, E.A. (2021) Search for ways to comprehensively solve the problems of creating a comfortable urban environment (using the example of yard landscaping). *Economics and entrepreneurship*, **1(126)**, 481-484. <https://doi.org/10.34925/EIP.2021.126.01.092>
3. Strokova, V.V., Khmara, N.O., Nelyubova, V.V., et al. (2021) Malye arhitekturnye formy: sostav i svoystva betonov dlya ih polucheniya [Small architectural forms: composition and properties of concrete for their production]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 11, 8-31. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31>
4. Slavcheva, G.S. (2021) Stroitel'naya 3D-pechat' segodnya: potencial, problemy i perspektivy prakticheskoy realizacii [3D-Build Printing Today: Potential, Challenges and Prospects for Implementation]. *Building materials*, 5, 28–36. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
5. Slavcheva, G.S., Lapyrev S.N. (2024) Perspektivy additivnyh tekhnologij v stroitel'stve: ozhidaniya i real'nost' [Prospects of additive technologies in construction: expectations and reality]. *Concrete and reinforced concrete*, 5(624), 53-60. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-53-60](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-53-60)
6. Slavcheva, G.S., Britvina, E.A., Shvedova, M.A. (2023) 3D-printable concrete with specific decorative and technological properties. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 3(108), 10805. <https://doi.org/10.4123/CUBS.108.5>



7. Chiew, S.M., Ibrahim, I.S., Ariffin, M.A.M., et al. (2021) Development and properties of light-transmitting concrete (LTC) – A review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124780>
8. Chiew, S.M., Ibrahim, I.S., Sarbini, N.N., et al. (2021) Development of light-transmitting concrete – A review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1046 – 1050. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.166>
9. Subathra, P., Sangeetha, S.P. (2021) Study on pellucid concrete incorporating optical fibers—a review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6682 – 6686. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.110>
10. Nam, H.P., Hai, N.M., Huong, N.V., et al. (2023) Experimental study on 80 MPa grade light transmitting concrete with high content of optical fibers and eco-friendly raw materials. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01810. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01810>
11. Navabi, D., Amini, Z., Rahmati, A., et al. (2023) Developing light transmitting concrete for energy saving in buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01969. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01969>
12. Suleymanova, L. A., Malyukova, M. V., Ryabchevskiy, I. S., et al. (2021) Illuminated concrete using rock crushing waste. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*, 12, 8-16. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-8-16>
13. Suleymanova, L.A., Malyukova, M.V., and Koryakina, A.A. (2021) Research of photoluminescent pigment for use in luminous architectural and decorative concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*, 6, 8-18. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-6-8-18>
14. Patent RF 2715494. Sposob izgotovleniya izdelij iz dekorativnogo betona s fotolyuminescentnym pigmentom [Method of making articles from decorative concrete with photoluminescent pigment]. Sulejmanova, L.A., Malyukova, M.V., Koryakina, A.A. Declared 14.10.2019. Published 28.02.2020. Bulletin No. 7. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42587727>
15. Wang, W., Sha, A., Falchetto, A.C., et al. (2022) Properties analysis of self-luminous cement-based materials with different colors and their visual comfort evaluation on pavement. *Solar Energy*, 247, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.013>
16. Wang, W., Sha, A., Lu, Z., et al. (2021) Cement filled with phosphorescent materials for pavement: Afterglow decay mechanism and properties. *Construction and Building Materials*, 284, 122798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122798>
17. Saleem, M., Hosoda, A. (2021) Development and testing of glow-in-the-dark concrete based raised pavement marker for improved traffic safety. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(5), 278-287. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.14902>
18. Wang W., Sha A., Lu Z., et al. (2021) Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 269, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121267>
19. Wang, W., Sha, A., Li, X., et al. (2022) Water resistance and luminescent thermal stability of SiO₂ coated phosphor and self-luminous cement-based materials: View from the perspective of hydration balance. *Construction and Building Materials*, 319, 126086. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126086>
20. Guo, R., Liu, S. (2022) Design and experiment of self-luminescent asphalt-based pavement materials. *Construction and Building Materials*, 342, 127991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127991>
21. Han, C., and Yang, S. (2024) Design of optical performance for self-luminous pavement materials. *Construction and Building Materials*, 449, 138597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138597>
22. Slavcheva, G.S., and Artamonova, O.V. (2018) Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation. *Magazine of Civil Engineering*, 8 (84), 97-108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.799.282>
23. Patent RF 2729283. Dvuhfaznaya smes' na osnove cementa dlya kompozitov v tekhnologii stroitel'noj 3D-pechati [Two-phase mixture based on cement for composites in construction 3D printing technology]. Slavcheva, G.S., Artamonova, O.V., Britvina, E.A., et al. Declared 21.10.2019. Published 05.08.2020. Bulletin No. 22. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43909130>
24. Patent RF 2729085. Dvuhfaznaya smes' na osnove cementa dlya kompozitov v tekhnologii stroitel'noj 3D-pechati [Two-phase mixture based on cement for composites in construction 3D

Kotova, K.; Shvedova, M.; Yurov, P.; Glukhov, S.; Ovcharov, R.

The effect of photoluminescent powder on the rheological properties of architectural cement composites for 3D printing; 2026; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 121 Article No 12105. doi: 10.4123/CUBS.121.5



- printing technology]. Slavcheva, G.S., Artamonova, O.V., Britvina, E.A., et al. Declared 21.10.2019. Published 04.08.2020. Bulletin No. 22. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43908931>
25. Yurov, P.Yu., and Karakchi-Ogli, D.R. (2025) Vliyanie tekhnologicheskikh svoystv cementnoj smesi na kachestvo sloistyh 3D-pechatnyh elementov [Effect of cement mixture technological properties on the layered 3D-printed elements quality]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University, 1(62), 139-154. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/139-154>
 26. Babenko, D.S. (2024) Obosnovanie trebovanij k nomenklature i znacheniyam tekhnologicheskikh svoystv smesej dlya additivnyh stroitel'nyh tekhnologij [Substantiation of the requirements for the nomenclature and values of technological properties of mixtures for additive construction technologies]. V International Scientific and Technical Conference on Physics of Materials, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2024), ARKAIM, 22-30 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69150604>
 27. Russel, N., and Lanos, C. (2003) Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. Applied Rheology, 13(3), 3-5. <https://doi.org/10.1515/arh-2003-0009>
 28. Russel, N. (2005) Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. Cement and Concrete Research, 35(9), 1656-1664. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.001>
 29. Perrot, A., Rangeard, D., and Pierre, A. (2016) Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures, 49, 1213-1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
 30. Slavcheva, G.S., Shvedova, M.A., and Babenko, D.S. (2018) Analiz i kriterial'naya ocenka reologicheskogo povedeniya smesej dlya stroitel'noj 3D-pechati [Analysis and criterion assessment of rheological behavior of mixtures for 3D construction printing]. Building Materials, 12, 34-40. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
 31. Slavcheva, G.S., Telichko, V.G., Yurov, P.Y., et al. (2025) [Numerical simulation of construction 3D printing process. Problems and solution methods]. Construction Materials, 7, 12-20. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-837-7-12-20>