

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ 3D АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Л.Х. Загороднюк, М.Ю. Елистраткин,
Д.С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова»
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы наблюдается активное развитие 3D аддитивных технологий. Данная тенденция не могла не затронуть строительную отрасль. Однако печать с использованием пластмасс и прочих органических соединений значительно отличается по своим технологическим особенностям от печати строительных составов. Бетоны и растворы, применяемые при послойной печати, должны обладать рядом технологических свойств, таких как достаточная вязкость для выдавливания экструдером, низкая подвижность для сохранения геометрии после укладки, высокая скорость схватывания и прочность после затвердевания. В настоящее время существует ряд составов, удовлетворяющих данным требованиям, однако они, как правило, не отличаются высокой прочностью и требуют наличия широкой сырьевой базы, которая может быть недоступна в условиях полевой печати. Как следствие, необходимо расширять спектр строительных составов для 3D-печати, подходящих под вышеназванные критерии, а также удовлетворяющих экономическим показателям.

Материалы и методы. Проведены исследования с применением физико-механических испытаний, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии по влиянию тонкомолотых минеральных добавок на микроструктуру и процессы твердения композиционных вяжущих с различными дозировками функциональных добавок.

Результаты. Представлены результаты исследований по получению композиционных вяжущих для 3D аддитивных технологий с использованием портландцемента и техногенных отходов – отходов мокрой магнитной сепарации старооскольского электрометаллургического комбината, модифицированных добавками-ускорителями (Технониколь Master) и пластификаторами (Полипласт ПК-R), с применением математического планирования и построением математических моделей для композиционных вяжущих, обладающих различными сроками твердения.

Заключение. Доказана эффективность использования полученного композиционного вяжущего, применение которого обеспечивает повышение реологических свойств, а также даёт возможность экономить дорогостоящий портландцемент.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционные вяжущие, сухие строительные смеси, 3D аддитивные технологии, строительная 3D-печать, реология, активные добавки.

Поступила 08.08. 21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Загороднюк, Л.Х. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий / Л.Х. Загороднюк, М.Ю. Елистраткин, Д.С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 428-439.

© Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури Саад Кхалил Шадид, 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>

COMPOSITE BINDERS FOR 3D ADDITIVE TECHNOLOGIES

Lilia Kh. Zagorodnuk, Mikhail Yu. Elistratkin,
Daniil S. Podgorny, Al Mamuri Saad Khalil Shadid
V. G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

ABSTRACT

Introduction. In recent years, there has been an active development of 3D additive technologies. This trend could not but affect the construction industry. However, printing using plastics and other organic compounds differs significantly in its technological features from printing with building compounds. Concrete and mortars used in layer-by-layer printing must have a number of technological properties, such as sufficient viscosity for extrusion by an extruder, low mobility to maintain geometry after laying, high setting speed and strength after hardening. Currently, there are a number of compositions that meet these requirements, however, they, as a rule, are not distinguished by high strength and require a wide raw material base, which may not be available in field printing conditions. As a result, it is necessary to expand the range of building materials for 3D printing, suitable for the above criteria, as well as satisfying economic indicators.

Materials and methods. Research has been carried out using physical and mechanical tests, X-ray phase analysis and electron microscopy on the effect of finely ground mineral additives on the microstructure and hardening processes of composite binders with various dosages of functional additives.

Results. The results of studies on the production of composite binders for 3D additive technologies using Portland cement and man-made waste - waste of wet magnetic separation of the Stary Oskol electrometallurgical plant, modified with additives accelerators (Technonikol Master) and plasticizers (Polyplast PK-R) using mathematical planning and construction of mathematical models for composite binders with different hardening times are presented.

Conclusion. The efficiency of using the obtained composite binder has been proven, the use of which provides an increase in rheological properties, and also makes it possible to save expensive portland cement.

KEYWORDS: composite binders, dry building mixtures, 3D additive technologies, 3D construction printing, rheology, active additives.

Submitted 08.08.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Lilia Kh. Zagorodnuk, Mikhail Yu. Elistratkin, Daniil S. Podgorny, Al Mamuri Saad Khalil Shadid. Composite binders for 3d additive technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 428-439. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439>.

© Zagorodnuk L.Kh., Elistratkin M.Yu., Podgorny D.S., Al Mamuri Saad Khalil Shadid, 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии производства строительных изделий и конструкций имеют свои специфические требования, в равной степени это относится и к 3D аддитивным технологиям. Особенности этих технологий заключаются в послойном отверждении строительной смеси по 3D-модели, подготовленной методом компьютерного 3D-моделирования. Именно специфика послойной технологии требует использования в технологическом процессе сухих строительных смесей (ССС), обеспечивающих высокие показатели качества готовой конструкции.

Применение композиционных вяжущих и сухих строительных смесей в 3D-технологиях позволяет значительно повысить ряд технологических характеристик и снизить материалоемкость.

Учитывая особенности возведения зданий и сооружений по 3D-технологии, которая заключается в послойном формовании элементов сооружения и их последующем отверждении в отформованной конструкции, предъявляются особые требования к формовочным смесям по удобоукладываемости, срокам схватывания, требуемой прочности, а в зависимости от назначения объекта и другим специфическим требованиям.

При проектировании СССР для 3D-технологий исключительно важным является выбор вяжущих веществ, учитывая, что именно вяжущее в значительной мере определяет основные технологические, физико-механические и эксплуатационные свойства формовочных

смесей и затвердевших бетонных конструкций.

Как правило, в 3D аддитивных технологиях используют портландцемент или гипс, однако эффективным альтернативным решением по применяемому вяжущему являются композиционные вяжущие, которые позволяют значительно экономить дорогостоящий и энергоемкий цемент или гипс^{1,2,3}.

Уникальные свойства композиционных вяжущих обусловлены рациональным подбором составов вяжущего компонента и минеральных наполнителей. Важно отметить необходимость ориентации на новую сырьевую базу из горных пород с высокой внутренней энергией^{4,5}.

Применение химических добавок позволяет проводить «тонкую настройку» разрабатываемого композиционного вяжущего. Именно эти добавки дают возможность получения в больших объемах композиционных вяжущих и сухих строительных смесей на их основе для применения в строительной 3D-печати [1, 2]. Применение добавок-ускорителей и пластификаторов позволяет снизить расход цемента до 15% и более [5].

Основной критерий оценки эффективности добавок-ускорителей – это ускорение процесса твердения на 25% и прочности бетона на 20% на первые сутки при стандартных условиях [6].

Важной особенностью формовочных растворов для 3D аддитивных технологий является их способность сохранять свои реологические свойства в течение 20–40 мин с применением капсульной системы загрузки

¹ Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Глаголев Е.С., Елистраткин М.Ю., Лашина И.В., Масанин О.О. Объективные предпосылки перехода к композиционным вяжущим // В сборнике: Наукоемкие технологии и инновации. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 2016. С. 110–116.

² Дребезгова М.Ю., Евсюкова А.С., Чернышева Н.В., Потапов В.В. К вопросу управления процессами структурообразования композиционных гипсовых вяжущих // В сборнике: Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, чл.-кор. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 263–268.

³ Минаков С.В., Елистраткин М.Ю. К вопросу выбора компонентов композиционных вяжущих // В сборнике: Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»), г. Грозный. 2015. С. 365–370.

⁴ Сулейманова Л.А., Лесовик В.С., Глаголев Е.С. Высокая реакционная активность наноразмерной фазы кремнезема композиционного вяжущего // В сборнике: Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова. 2015. С. 87–93.

⁵ Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Володченко А.А., Глаголев Е.С., Дребезгова М.Ю. Композиционные материалы с использованием энергосберегающего техногенного сырья для 3D аддитивных технологий // В сборнике: НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ. Сборник докладов международной научно-практической конференции. 2016. С. 452–456.

строительного принтера. Изменение реологии смеси до момента её формования создаст значительные затруднения для дальнейшей подачи её в формирующую головку из смесителя-бетононасоса по трубопроводу [3, 4].

Следует правильно совмещать различные добавки, так как на практике они могут быть несовместимыми, что приведет к коагуляции и полной нейтрализации действия как пластифицирующего, так и ускоряющего компонента. Совместимость добавок с цементами вызваны их минеральным составом, видом и типом заполнителя, роли контактной зоны на границе заполнитель – цементный камень – добавки. До сих пор не предложено общих единых подходов к оценке совместимости компонентов формовочных бетонных смесей для 3D аддитивных технологий [7, 8].

При проектировании бетонных составов для 3D аддитивных технологий часто поднимают вопрос полноценного армирования конструкций, а также заводского производства армирующих элементов для 3D-печати. Стоит отметить, что классическое армирование каркасами и сетками создаст значительные трудности для автоматизации процесса укладки смеси, что наводит на мысль применения дисперсной арматуры (фибробетон) и неметаллических тканых сеток (текстиль-бетон) [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Наряду с созданием композиционных вяжущих для этих технологий необходимо изучить и разработать составы с дисперсным армированием.

Получение высоких прочностных показателей конструкций на основе данной технологии не является первостепенной задачей, а значит, ключевыми моментами при проектировании сухих строительных смесей для 3D аддитивных технологий стоит считать регулирование реологических свойств смеси и сроков её схватывания [16, 17, 18, 19].

Проблема создания композиционных вяжущих с эффективными функциональными добавками и их оптимальными дозировками, а также регулирование физико-механических, технологических и реологических свойств является актуальной задачей в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использованы следующие сырьевые компоненты: портландцемент марки 500 без минеральных добавок (ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2016) производства ЗАО «Осколцемент», в качестве минеральной добавки применялись отходы мокрой магнитной сепарации (ММС), для достижения требуемых реологических свойств были использованы пластифицирующая добавка Полипласт ПК-R и ускоритель твердения Технониколь Master.

Для приготовления композиционных вяжущих различных составов производился совместный помол сырьевых компонентов в лабораторной вибрационной мельнице MB-20. Изучена микроструктура гидратированных образцов на электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA3 LMU. Определение фазового состава полученных композиционных вяжущих производилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Реологические свойства определялись методом миниконуса (основания миниконуса 20 и 40 мм). Физико-механические свойства определяли в соответствии с требованиями ГОСТ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При математическом планировании эксперимента определён оптимальный диапазон дозирования компонентов: отходов ММС от 0 до 50% (X_2), Полипласт ПК-R использовался в дозировке 0,4%, Технониколь Master в дозировках от 0 до 6% (X_1), на основании принятых дозировок была составлена матрица планирования экспериментов, в которой учитывалось два переменных фактора: количество отходов ММС (0,25 и 50% от массы цемента, коэффициенты $X_2=1, 0, -1$ соответственно) и ускорителя твердения (0,3 и 6% от массы цемента, коэффициенты $X_1=-1, 0, 1$ соответственно). Результаты физико-механических испытаний образцов представлены в таблице и на рисунке 1.

Таблица
Матрица планирования эксперимента

Table
Experiment Plannig matrix

Точка плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействия факторов	Расплав мини-конуса, мм, через мин			Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут					
						0	10	20	2 _{ср}	2 _{макс}	7 _{ср}	7 _{макс}	28 _{ср}	28 _{макс}
	x ₁	x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₁ x ₂									
1	1	1	1	1	1	40	40	40	5,9	7,6	52,1	53,8	74,43	76,86
2	1	-1	1	1	-1	145	40	40	1,4	1,5	19,3	19,6	27,57	28,00
3	-1	1	1	1	-1	140	140	140	22,9	26,2	47,9	47,9	68,43	68,43
4	-1	-1	1	1	1	150	180	200	14,7	14,8	23,3	23,5	33,29	33,57
5	1	0	1	0	0	55	40	40	2,7	2,7	36,7	42,3	52,43	60,43
6	-1	0	1	0	0	140	135	130	24,6	25,5	35	38,4	50,00	54,86
7	0	1	0	1	0	130	40	40	19,0	23,8	36,4	51,2	52,00	64,00
8	0	-1	0	1	0	150	135	120	5,0	5,4	21,8	22,4	31,14	32,00
9	0	0	0	0	0	40	40	40	6,2	7	35,7	38,6	51,00	55,14

МПа

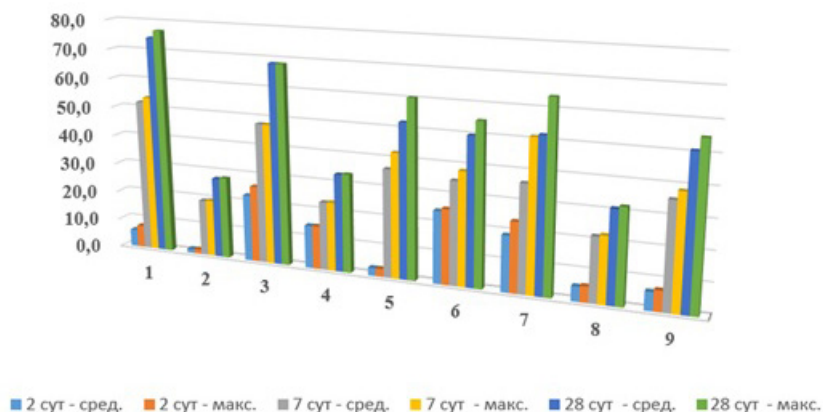


Рисунок 1 – Изменение прочности образцов композиционных вяжущих различных составов в зависимости от сроков твердения

Figure 1 – Change in strength of composite binder samples of different compositions as a function of curing time

На основании полученных результатов была проведена статистическая обработка данных в Microsoft Excel и составлены математические модели, позволяющие получать составы с заданными прочностными показателями в исследуемом диапазоне дозирования отходов ММС и добавки-ускорителя. Уравнения регрессии прочности композиционных вяжущих на сжатие:

$$R^2_{\text{план}2} = 9,86 - 8,7x_1 + 4,45x_2 + 1,967x_1^2 + 0,317x_2^2 - 0,925x_1 \cdot x_2;$$

$$R^7_{\text{план}2} = 32,86 - 0,317x_1 + 12x_2 + 4,417x_1^2 - 2,33x_2^2 + 2,05x_1 \cdot x_2;$$

$$R^{28}_{\text{план}2} = 46,937 + 0,452x_1 + 17,143x_2 + 6,31x_1^2 - 3,33x_2^2 + 2,929x_1 \cdot x_2.$$

На основании данных уравнений были составлены номограммы (рисунок 2), визуально отображающие зависимость прочности от принятых переменных параметров.

Исследованы фазовый состав и микроструктура образцов композиционных вяжущих с оптимальными технологическими и прочностными свойствами.

Анализ дифрактограмм (рисунок 3) проводился для образцов с наилучшими показателями прочности и требуемым расплавом миниконуса – 40 мм через 20 мин после затвердения (составы 1,3,5,9).

Бездобавочный (контрольный) состав №3 готовился с использованием товарного порт-

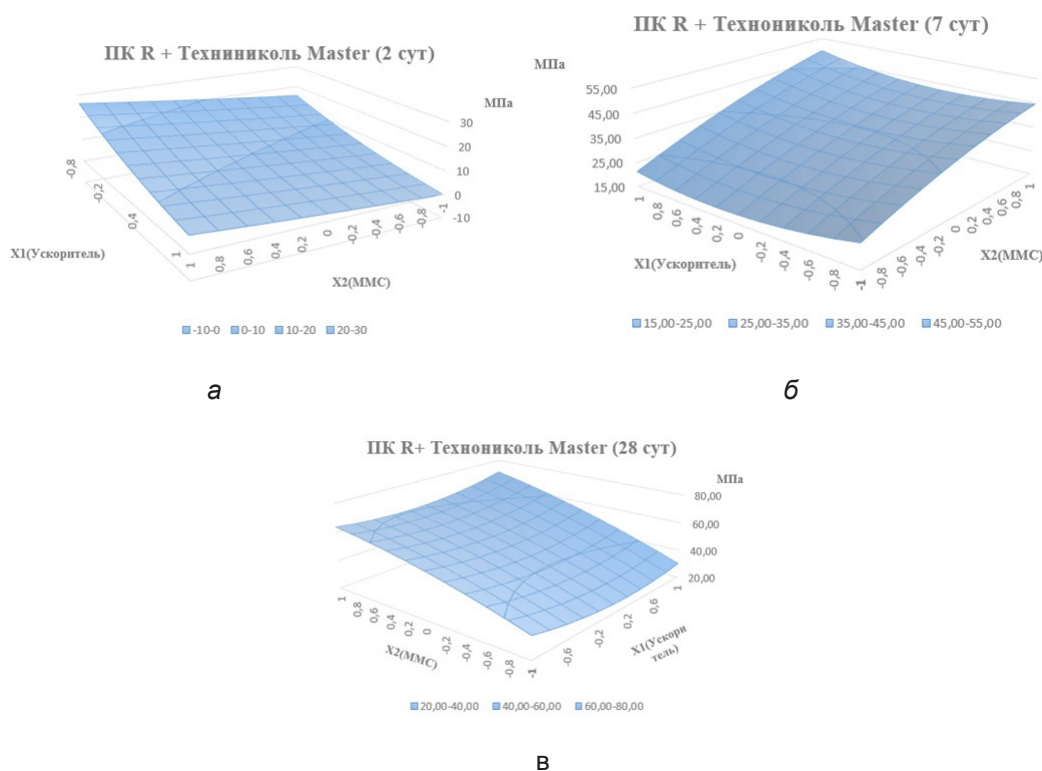


Рисунок 2 – Номограммы прочности композиционных вяжущих различных составов в возрасте: а – 2 сут; б – 7 сут; в – 28 сут

Figure 2 – Nomograms of the strength of composite binders of different compositions at the age of: a - 2 days; б - 7 days; в - 28 days

ландцемента без минеральной добавки и ускорителя. Прочность данного состава составила 68,43 МПа, однако расплыв конуса не соответствовал предъявляемым требованиям и составил 140 мм через 20 мин после затворения. На дифрактограммах отчётливо видно высокое содержание гидросиликатов кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и незначительное количество портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что свидетельствует о классическом протекании гидратационных процессов.

Состав композиционного вяжущего №1 на основе товарного цемента и добавки-ускорителя Техникиколь Master в количестве 6% показал: прочность 74,43 МПа (на 8% выше контрольного), что обусловлено введением добавки-ускорителя и активизацией гидратации на ранних стадиях твердения. Данный состав удовлетворил поставленным технологическим требованиям по реологии (расплыв миниконуса составил 40 мм через 20 мин). Анализ дифрактограмм данного состава показал увеличение дифракционных максимумов, гидросиликатам кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97;$

$2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и снижением дифракционных максимумов, присущих портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что обусловлено более активными процессами гидратации на ранних стадиях.

Композиционные вяжущие составов №5 и 9, приготовленные с применением товарного портландцемента в количестве 75% и отходов ММС в количестве 25%, а также с использованием добавки-ускорителя в диапазоне от 3 до 6% показали, что прочности данных вяжущих близки и составляют 52,43 МПа и 51,00. Технологические требования этих составов по реологии удовлетворяли требованиям и составляли 40 мм спустя 20 мин после затворения. Анализ дифрактограмм показывает высокое содержание гидросиликатов кальция CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$) и незначительное содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$), что свидетельствует о более полном протекании гидратационных процессов. При этом отмечается присутствие кремнеземистых компонентов SiO_2 ($d=4,25; 2,45; 2,28; 1,817; 1,54 \text{ \AA}$), вносимых отходами мокрой магнитной сепарации.

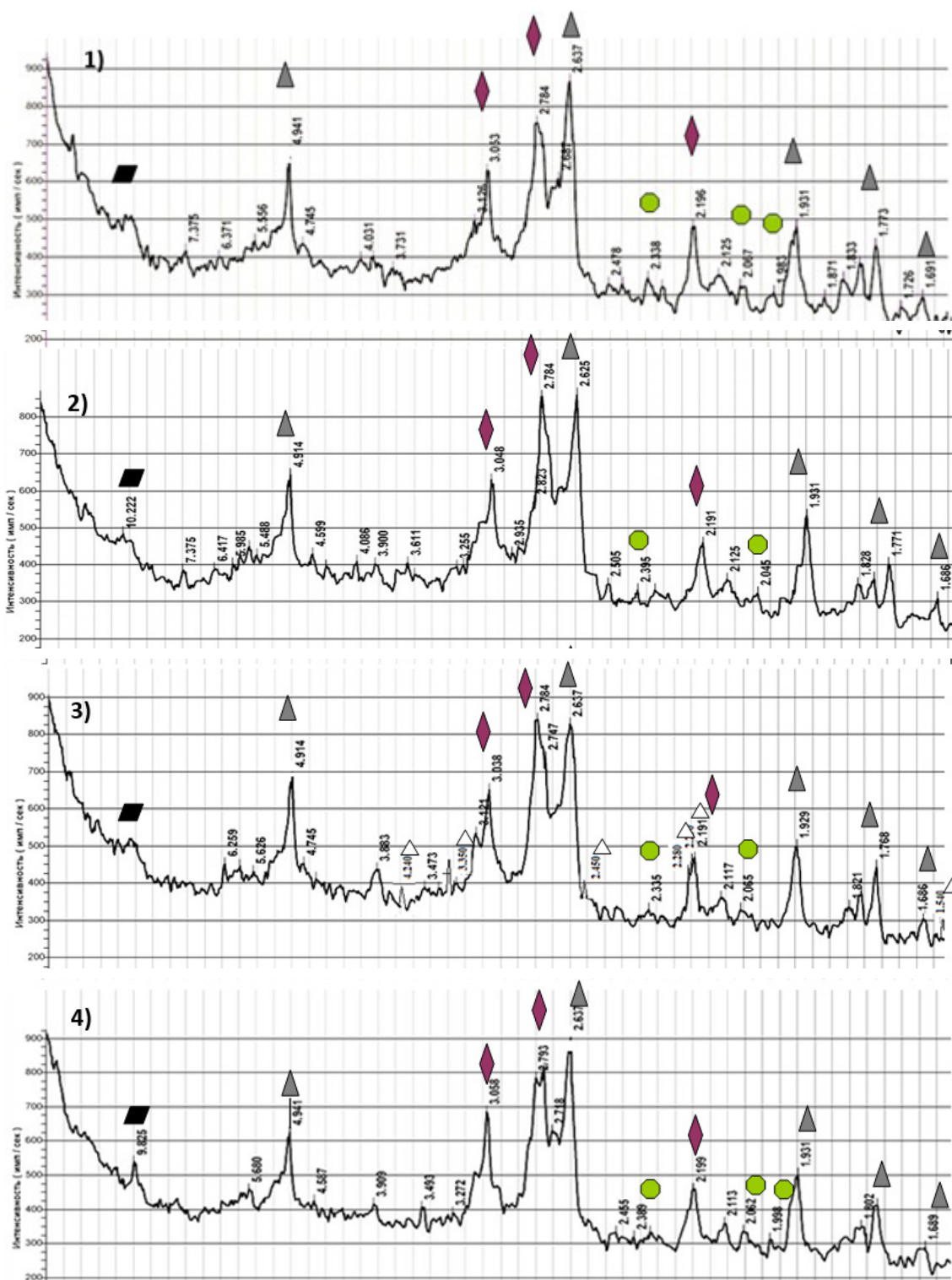


Рисунок 3 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм: 1 – портландцемент 100%+6% Технониколь Master; 2 – портландцемент 100%; 3 – портландцемент 75%+25% MMC%+6% Технониколь Master; 4 – портландцемент 75%+25% MMC%+3% Технониколь Master

Figure 3 – Fragments of X-ray diffractograms: 1 – Portland cement 100%+6% Technonikol Master; 2 – Portland cement 100%; 3 – Portland cement 75%+25% MMC%+6% Technonikol Master; 4 – Portland cement 75%+25% MMC%+3% Technonikol Master

Анализ микроструктур цементных камней, приготовленных на товарном портландцементе (100%) и с использованием добавки-ускорителя Технониколь Master показывает, что структура в возрасте 28 сут характеризуется как равномерно-зернистая и плотная, отмечается незначительное количество пор по всему объёму. Микроструктура цементного камня с добавкой-ускорителем характеризуется более равномерно-зернистой структурой по всему объёму образца, что обуславливается действием добавок-ускорителей, которые активизируют процессы гидратации цементных систем и приводят к интенсификации образования гелей, которые в свою очередь захватывают значительное количество жидкой фазы. В результате этих процессов происходит ускорение схватывания и более интенсивное упрочнение цементного камня.

На микрофотографиях видно, что с ускорением процессов гидратации происходило ускорение образования трёхмерных зародышей новой фазы и увеличение дисперсности продуктов гидратации (рисунок 4).

Анализ микроструктур (рисунок 5) композиционного вяжущего составов: портландцемент – 75%, отходы ММС – 25% и различным содержанием добавки-ускорителя Технониколь Master – 3–6% показывает, что структура изломов образцов равномерно-зернистая и визуально схожа со структурой чистого цементного камня, наблюдается наличие незначительного

количества пор от 0,03 мм до 0,5 мм. При увеличении до 100 мкм видны включения зёрен минерального наполнителя – отходов мокрой магнитной сепарации, которые равномерно распределены в общем объёме материала и плотно обросли цементными новообразованиями. При дальнейшем увеличении до 10 мкм наблюдается картина, подобная бездобавочному цементному камню: структура обусловлена наличием отдельных блоков-агрегатов, образованных параллельно ориентированными слоями чешуйчатых поликристаллов, ориентация слоёв ограничена размерами одного блока. При детальном рассмотрении наблюдается параллельная слоистость на отдельных участках микрофотографий. Особенностью композитного состава с применением минерального наполнителя является то, что частицы ММС, присутствуя в цементной матрице, уплотняют структуру и одновременно служат демпферами для снижения внутренних напряжений. Все частицы дисперсного минерального наполнителя покрыты субмикроструктурной оболочкой в виде бахромы. Появление такой структуры говорит о возможности протекания гидратации на поверхности частиц минеральной добавки с образованием субмикроструктурных гидратных фаз, уплотняющих структуру полученного камня за счёт создания дополнительных связей между отдельными зёрнами композита.

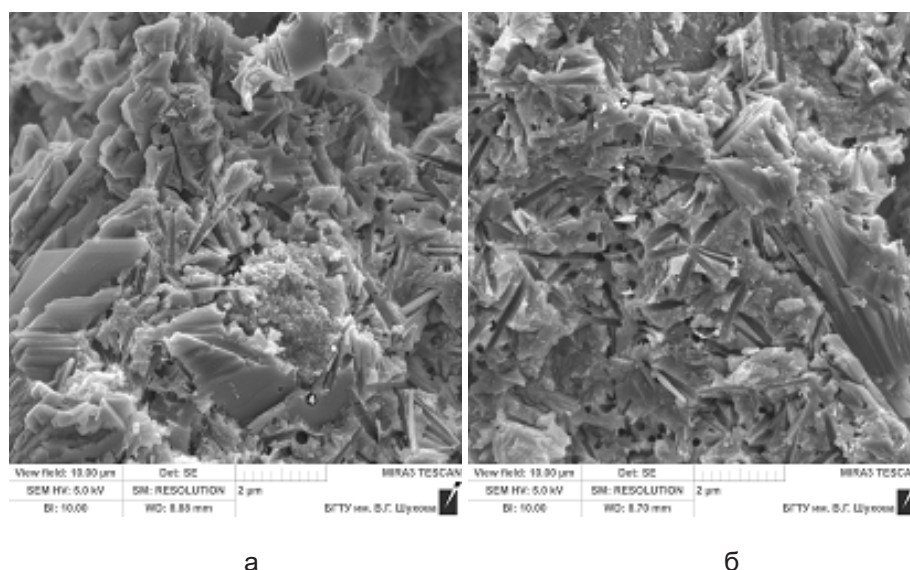


Рисунок 4 – Микроструктура: а – контрольного состава №3; б – композиционного состава №1, портландцемент – 100%, Технониколь Master – 6%

Figure 4 – Microstructure: a – control composition No. 3; b – composite composition No. 1, Portland cement – 100%, Technonikol Master – 6%

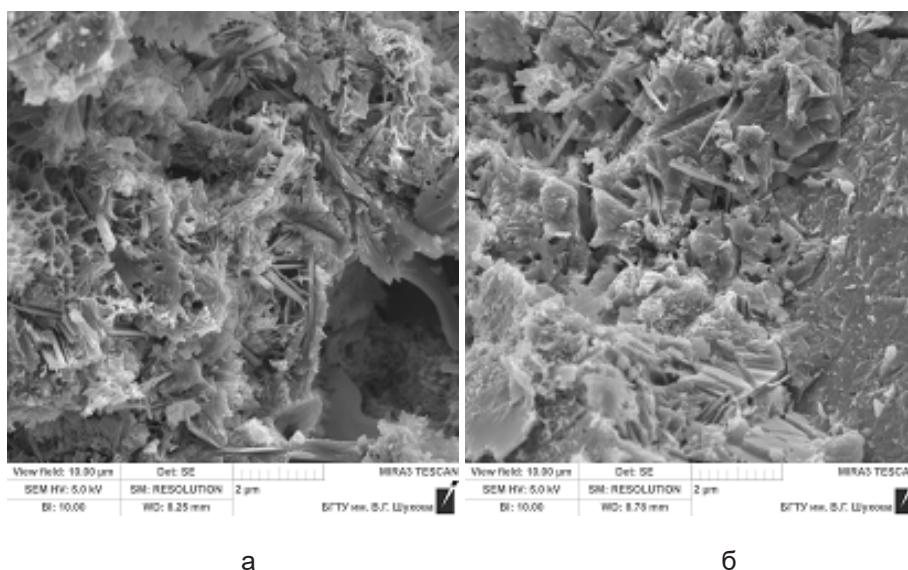


Рисунок 5 – Микроструктура: а – композиционного состава №5, портландцемент – 75%, отходы MMC – 25%, Технониколь Master – 6%; б – композиционного состава №5, портландцемент – 75%, отходы MMC – 25%, Технониколь Master – 3%

Figure 5 – Microstructure: a – composition No. 5, Portland cement – 75%, MMC waste – 25%, Technonikol Master – 6%; b – composition No. 5, Portland cement – 75%, MMC waste – 25%, Technonikol Master – 3%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рациональный подбор комбинации активного компонента и минеральных добавок является главным критерием, формирующим свойства композиционных вяжущих. За счёт химических модификаторов – пластификаторов и ускорителей твердения – реализуется «тонкая настройка» системы, что обуславливает выполнение требуемых технологических и физико-механических показателей в новой инновационной технологии строительства.

Проведена статистическая обработка экспериментальных данных, в результате чего были получены математические модели изменения прочностных показателей от составов композиционных вяжущих, обеспечивающих требуемые свойства растворным смесям для 3D аддитивной технологии. Полученные номограммы позволят оптимизировать технологический процесс приготовления и укладки формовочных смесей в возводимый строительный объект.

Наличие минерального наполнителя в гидратированных растворах в виде отходов MMC способствует заполнению внутренних пор и дефектов, что обеспечивает формирование плотной структуры цементного камня. Использование отходов MMC в качестве наполнителя в сухих строительных смесях позволяет экономить дорогостоящий энергоёмкий портланд-

цемент, снижая экономические затраты, одновременно повышая физико-механические показатели вяжущего и долговечность за счёт уплотнения структуры материала.

Исследования микроструктур сколов цементных камней полученных композиционных вяжущих показали, что все частицы дисперсного минерального наполнителя покрыты субмикроструктурной структурой в виде бахромы. Такие структуры говорят о возможности протекания процессов гидратации на поверхности зерен минерального наполнителя с образованием дополнительных субмикроструктурных гидратных фаз, которые уплотняют структуру цементного камня и дополнительно связывают отдельные зерна композита, что адекватно согласуется с достаточно высокими показателями цементного камня по прочности при сжатии.

Разработаны рациональные составы сухих строительных смесей на предложенных композиционных вяжущих для использования в 3D-технологиях. Показано, что составы сухих строительных смесей для использования 3D-технологий удовлетворяют технологическим и эксплуатационным требованиям, что позволяет рекомендовать их применять для апробирования в промышленных условиях согласно технологическому регламенту и проекту сооружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24113.

The work is realized in the framework of the RFBR according to the research project № 18-29-24113.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапелин А.Н., Елистраткин М.Ю. Лёгкие бетоны нового поколения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 79–83.

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials 260 (2020) 120440

3. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Куприна А.А., Елистраткин М.Ю., Володченко А.Н. Эффективные кладочные растворы для автоклавных стеновых материалов // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 22–25.

4. Zagorodnyuk L.K., Sumskey D.A. Study of the hydration processes of modified binders by infrared spectroscopy // Materials Science Forum. 2019. T. 974. С. 49–54.

5. EgorSecieru, Shirin Fataei, Christof Schröfl, Viktor Mechtcherine. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology // Construction and Building Materials. Volume 144, 30 July 2017, Pages 451–461

6. Рахимбаев Ш.М., Шахова Л.Д., Твердохлебов Д.В. Реологические свойства пеноцементных систем с добавкой анионного пенообразователя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2003. № 4. С. 6.

7. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. 10. С. 6–14

8. Чернышева Н.В., Агеева М.С., Эльян Исса Жамал Исса, Дребезгова М.Ю. Влияние минеральных добавок различного генезиса на микроструктуру гипсоцементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 12–18.

9. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 9–16.

10. Nadv R., Peled A., Mechtcherine V., Hempel S., Nicke D., Schroefl C. (2018) Improved Bonding of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites by Mineral Particle Coating. In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) Strain-Hardening Cement-Based Composites. SHCC 2017. RILEM Bookseries, vol 15. Springer, Dordrecht

11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction

material // Materials Letters. Volume 209, 15 December 2017, Pages 146–149

12. Christ S. et al. Fiber reinforcement during 3D printing // Materials Letters. – 2015. – Т. 139. – С. 165–168.

13. Лесовик В.С., Попов Д.Ю., Глаголев Е.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 81–84.

14. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. № 3–4 (68–69). С. 39–42.

15. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan & Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and construction industry: a review // Virtual and Physical Prototyping. Volume 12, 2017 - Issue 3. Pages 261–276

16. Nerella V. N. et al. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D) // Rheologische Messungen an Baustoffen 2016: Tagungsband zum 25. Workshop und Kolloquium, 2. und 3. März an der OTH Regensburg. – tredition, 2016.

17. Савицкий Н.В., Шатов С.В., Ожищенко О.А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (216). С. 18–26.

18. Compton B. G., Lewis J. A. 3D printing of lightweight cellular composites // Advanced materials. – 2014. – Т. 26. – №. 34. – С. 5930–5935.

19. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Абсиметов М.В., Шаталова С.В., Лесниченко Е.Н. Адаптация технологии неавтоклавнога газобетона к строительной 3D-печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 6–11.

REFERENCES

1. Sapelin A.N., Elistratkin M.YU. Lyogkie betony novogo pokoleniya [Lightweight concretes of the new generation] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2014. 4: 79–83. (In Russian)

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials 260 (2020) 120440

3. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Kuprina A.A., Elistratkin M.YU., Volodchenko A.N. effektivnye kladochnye rastvory dlya avtoklavnyh stenovykh materialov [Effective masonry solutions for autoclave wall materials] // Stroitel'nye materialy. 2016. 12: 22–25. (In Russian)

4. Zagorodnyuk L.K., Sumskey D.A. Study of the hydration processes of modified binders by infrared spectroscopy // Materials Science Forum. 2019. T. 974. S. 49–54.

5. EgorSecieru, Shirin Fataei, Christof Schröfl, Viktor Mechtcherine. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology // Construction and Building Materials. Volume 144, 30 July 2017, Pages 451–461

6. Rahimbaev SH.M., SHahova L.D., Tverdohlebov D.V. Rheologicheskie svoystva penocementnyh sistem s dobavkoj anionnogo penobrazovatelya [Rheological properties of foam cement systems with the addition of anionic foaming agent] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2003. 4: 6.

7. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., SHatalova S.V., Starikov M.S. Formirovanie svoystv kompozitsij dlya stroitel'noj pechati [Formation of properties of compositions for construction printing] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2017. 10: 6-14 (In Russian)

8. CHernysheva N.V., Ageeva M.S., El'yan Issa ZHamal Issa, Drebezgova M.YU. Vliyanie mineral'nyh dobavok razlichnogo genezisa na mikrostrukturu gipsocementnogo kamnya [The effect of mineral additives of various genesis on the microstructure of gypsum cement stone] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2013. 4: 12-18. (In Russian)

9. Lesovik V.S. Stroitel'nye materialy. Nastoyashchee i budushchee [Construction materials. Present and future] // *Vestnik MGSU*. 2017. 12. 1(100): 9-16. (In Russian)

10. Nativ R., Peled A., Mechtcherine V., Hempel S., Nicke D., Schroefl C. (2018) Improved Bonding of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites by Mineral Particle Coating. In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) *Strain-Hardening Cement-Based Composites*. SHCC 2017. RILEM Bookseries, vol 15. Springer, Dordrecht

11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material // *Materials Letters*. Volume 209, 15 December 2017, Pages 146-149

12. Christ S. et al. Fiber reinforcement during 3D printing // *Materials Letters*. – 2015. – T. 139. – S. 165-168.

13. Lesovik V.S., Popov D.YU., Glagolev E.S. Tekstil'-beton - effektivnyj armirovannyj kompozit budushchego [Textile-concrete is an effective reinforced composite of the future] // *Stroitel'nye materialy*. 2017. 3: 81-84. (In Russian)

14. Bazhenov YU.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novye betony [Ways of development of construction materials science: new concretes] // *Tekhnologii betonov*. 2012. 3-4 (68-69): 39-42. (In Russian)

15. Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan&Kah Fai Leong. 3D printing trends in building and construction industry: a review // *Virtual and Physical Prototyping*. Volume 12, 2017 - Issue 3. Pages 261-276

16. Nerella V. N. et al. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D) // *Rheologische Messungen an Baustoffen 2016: Tagungsband zum 25. Workshop und Kolloquium, 2. und 3. März an der OTH Regensburg*. – tradition, 2016.

17. Savickij N.V., SHatov S.V., Ozhishchenko O.A. 3D-pechat' stroitel'nyh ob'ektov [3D-printing of construction objects] // *Vestnik Pridneprovskoj gosudarstvennoj akademii stroitel'stva i arhitektury*, 2016, 3 (216): 18-26

18. Compton B. G., Lewis J. A. 3D printing of lightweight cellular composites // *Advanced materials*. – 2014. – T. 26. – № 34. – S. 5930-5935.

19. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., Absimetov M.V., SHatalova S.V., Lesnichenko E.N. Adaptatsiya tekhnologii neavtoklavnogo gazobetona k stroitel'noj 3d pechati [Adaptation of non-autoclaved aerated concrete technology to construction 3D printing] // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*. 2017. 8: 6-11 (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Загороднюк Л.Х. Формулировка направления и темы исследования, подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Контроль и консультирование по вопросам проведения эксперимента и написанию статьи.

Елистраткин М.Ю. Составление плана проведения эксперимента, консультирование по вопросам строительной 3D-печати, применению активных химических и минеральных добавок.

Подгорный Д.С. Проведение эксперимента, написание, редактирование и оформление статьи.

Ал Мамури Саад Халил Шадид. Проведение эксперимента.

COAUTHORS CONTRIBUTION

Lilia Kh. Zagorodnuk - Formulation of the direction and topic of the research, selection of the theoretical basis for the experiment. Supervising and advising on the conduct of the experiment and the writing of the paper.

Mikhail Yu. Elistratkin - Drawing up a plan for the experiment, advising on construction 3D printing, the use of active chemical and mineral additives.

Daniil S. Podgorniy - Carrying out the experiment, writing, editing and layout of the article.

Al Mamuri Saad Khalil Shadid - Conducting an experiment.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Загороднюк Лилия Хасановна – д-р техн. наук, проф., ORCID: 0000-0001-9840-4414, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, +7(980)524-47-12, lh47@mail.ru).

Елистраткин Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц., ORCID: 0000-0002-3303-224X, доц. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, mr.elistratkin@yandex.ru).

Подгорный Даниил Сергеевич – студент кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций, ORCID: 0000-0001-7435-5005 ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, dan_podgor@mail.ru).

Ал Мамури Саад Кхалил Шадид – аспирант кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, saad.shadeed.ss71@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lilia Kh. Zagorodnuk – Dr. of Sci., Professor, ORCID: 0000-0001-9840-4414, Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technologi-

cal University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, 7(980)524-47-12, lhz47@mail.ru).

Mikhail Yu. Elistratkin - Cand. of Sci., Associate Professor, ORCID: 0000-0002-3303-224X, Associate Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, r.elistratkin@yandex.ru).

Daniil S. Podgornyi, Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, dan_podgor@mail.ru).

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Postgraduate Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostyukova Str, saad.shadeed.ss71@gmail.com).