

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/article\_5cb1e65917fd15.03058522

<sup>1,\*</sup>Бахтина Т.А., <sup>1</sup>Любомирский Н.В., <sup>1</sup>Бахтин А.С., <sup>1</sup>Николаенко Е.Ю.<sup>1</sup>Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение)

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского

Россия, 295493, Республика Крым, г.Симферополь, ул. Киевская, 181.

\*E-mail: t.bakhtina83@gmail.com

## РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВО-КАРБОНАТНО-КАЛЬЦИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований по определению возможности получения карбонизированного материала на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций методом струйной 3D печати. Изучены некоторые виды материалов, применяемых в качестве связующих для неорганических вяжущих веществ. Определен эффективный способ упрочнения модели, полученной в процессе 3D печати. Определены физико-механические характеристики опытных образцов твердевших в среде повышенной концентрации углекислого газа. Установлено, что искусственная карбонизация образцов полученных на различных видах связующих в течение 90 мин способствует формированию достаточно прочной структуры из нерастворимого карбоната кальция – продукта карбонизации гидратной извести, а степень карбонизации зависит от вида связующего и его массовой доли в растворе. Выбраны наиболее эффективные виды связующих и определено оптимальное содержание исследуемых связующих в растворе. С позиции обеспечения получения материалов с достаточными физико-механическими свойствами в результате проведенных исследований подтверждена возможность получения карбонизированного материала методом струйной 3D печати при определенных оптимальных содержаниях исследуемых связующих в растворе.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, углекислый газ, известково-карбонатные системы, карбонатное твердение.

**Введение.** Трехмерная печать – это современная, динамично развивающаяся отрасль науки и техники, относящаяся к аддитивным технологиям [1, 2]. Это определение охватывает широкий спектр процессов и технологий, объединяет которые общая сущность процесса, а именно послойное формование трехмерной модели [3]. Впервые трехмерная печать как технология была запатентована Чарльзом Халлом (CharlesHall) в 1986 году в процессе известном, как стериолитография (SLA), за которым последовали следующие разработки [4]. В настоящее время существует более десятка различных способов трехмерной печати, большинство из которых используют свет или тепло для создания физических объектов из порошка или проволоки [5–7]. Струйная технология трехмерной печати состоит в нанесении на слой порошка определенной толщины, уложенного на рабочую площадку, связующей жидкости с помощью печатающей головки с форсунками [8–10]. В процессе струйной печати трехмерная компьютерная модель конвертируется с помощью процедуры нарезки в собрание двухмерных срезов, после наложения которых образуется 3D модель. Связующее наносится по заданному рисунку так, как установлено в текущем двухмерном срезе

сплошной модели. Далее строительная платформа продвигается вниз на один слой толщины, и поверх предыдущего распределяется новый слой порошка, по которому печатается следующий слой. Эта последовательность выполняется слой за слоем пока не будет готова вся модель. После завершения склеенную деталь можно извлекать из массы несвязанного порошка. Далее следует процесс укрепления полученной модели различными способами, т.к. после печати прочность материала модели достаточно низкая [11].

Реализация процесса струйной 3D печати включает в себя не только процесс печати, но и разработку подходящей комбинации системы «порошок-связующее» и процесс постобработки. Создание конкретного вида струйной трехмерной печати с новой комбинацией материалов состоит из ряда шагов: 1) определение состава порошка; 2) выбор метода связывания; 3) выбор состава жидкого связующего и проверка его пригодности для печати и взаимодействия с порошком; 4) определение параметров процесса печати; 5) составление процедур постобработки [9]. Выбор используемого порошка состоит в назначении вида материала, определении размера частиц, выбора добавки (если необходимо) и

типа связывания. Виды материалов, используемые для струйной 3D печати в настоящее время достаточно многообразны – это металлы, керамика, полимеры, неорганические вяжущие [12]. Изначально основным назначением струйной трехмерной печати было прототипирование, т.е. быстрое создание прототипов каких-либо деталей не массового выпуска. Основным недостатком технологии являлась низкая прочность и высокая пористость готовых прототипов, что сужало область использования. Поэтому постоянно ведется работа по усовершенствованию технологии и исключению заявленных недостатков. Для строительства использование аддитивной технологии впервые было предложено Джозефом Пегна для систем на основе цемента [13, 14]. В настоящее время для строительства выделяют три крупномасштабные аддитивные технологии – Contour Crafting, D-Shape (Monolite) и Concrete Printing [15]. Принцип струйной 3D печати реализован в порошковой технологии D-Shape, позволяющей создавать конструкции достаточно большого объема (в одном из проектов под названием «Radiolaria» были созданы конструкции высотой 1,6 м. В качестве вяжущего применяют порошки композиционного цемента, с возможностью армирования волокнами, а связующим могут выступать сахарная пудра, клей на основе поливинилового спирта (ПВА), клей на основе полиуретанового формальдегида, пшеничная паста, метилцеллюлоза, порошкообразный клей для дерева и шпатлевка [16]. В результате могут быть получены строительные материалы, имеющие прочность при сжатии, равную средним классам бетона и прочность на растяжение до 70 % больше, чем у бетона средних классов.

Не менее важным является процесс последующего укрепления полученного изделия различными способами, которые зависят от вида принятого порошка и связующего компонента. Ранее проведенные авторами исследования показали высокую эффективность химического процесса искусственной карбонизации гидратных фаз оксидов кальция и магния [17–19]. При этом образовавшиеся фазы карбонатов способствуют существенному увеличению физико-механических характеристик опытных образцов в короткие временные сроки. Также установлено, что строительные материалы на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций имеют повышенную долговечность в агрессивных средах, из-за более высокого сопротивления их гидратной и карбонатной магниевых фаз, при их наличии в исходном вяжущем. Процесс карбонизации также имеет низкую чувствительность к наличию различных примесей в исход-

ных сырьевых компонентах, что существенно упрощает процесс производства различных строительных изделий по технологии карбонатного твердения. Из анализа литературных источников, посвященных изучению карбонатного твердения известковых вяжущих и их разновидностей следует, что известковые вяжущие карбонатного твердения обладают высоким потенциалом, не используемым на данный момент промышленностью строительных материалов.

Целью данной работы была разработка системы «порошок-связующее» на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций карбонатного твердения для расширения базы строительных материалов, которые возможно использовать для осуществления струйной 3D печати.

**Методология.** При проведении исследования использовались следующие материалы:

Вяжущее вещество – пушенка кальциевая (отход производства ПАО «СЗ» по ТУ 57744-018-00723477-2015, является продуктом оседающем на рукавных фильтрах известеобжиговых шахтных печей), представляет собой мелкодисперсный порошок светло-серого цвета, химического состава:  $\text{CaO}_{\text{акт.}}$  +  $\text{MgO}_{\text{акт.}}$  – 52,0 % и минералогического состава:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – 54,72 %,  $\text{CaCO}_3$  – 28 %.

В качестве связующего применяли три вида материалов:

- сахарная пудра;
- метилгидроксипропилцеллюлоза (МГПЦ) Mecellose FMC 2070 со специальной модификацией. Вязкость 2 % водного раствора (20 °С): 18000-26000 мПа·с (по Брукфельду);
- поливинилацетатный клей (ПВА).

Для каждого вида связующего готовили растворы с заданной массовой долей и проверяли клеящую способность с помощью напыления раствора на тонкий слой вяжущего, распределенного на стеклянной пластине [16]. Для сахара готовили 3 раствора с массовой долей сахара в растворе 45, 25 и 15 %, для МГПЦ массовая доля составила 0,1 % и 0,5 %, для поливинилацетатного клея 2 и 6 %. За критерий пригодности испытываемых связующих принимали клеящую способность, характеризующуюся получением твердого слоя порошка вяжущего, на который напыляли раствор связующего, в максимально короткие сроки. По полученным результатам делали выводы об эффективности применения исследуемых связующих на принятом вяжущем (пушенка кальциевая). Диапазоны содержания данных видов связующих определяли исходя из возможности распыления полученного раствора через сопло распылителя. Соответственно, верхний предел исследуемого диапазона означает получение раствора связующего по-

вышенной вязкости и возможность его распыления резко снижается.

Влияние исследуемых связующих на процесс карбонатного твердения порошка вяжущего определяли на опытных образцах цилиндрах, которые получали методом прессования при удельном давлении 2,0 МПа. Низкое значение давления прессования было выбрано исходя из возможностей существующего промышленного 3D оборудования, а технология прессования максимально имитирует процесс послойного нанесения порошка на основу, его уплотнения, например, роликовым прокатом и последующего напыления на полученный слой связующего. Полученные образцы подвергали искусственной карбонизации в течение 90 мин. при концентрации  $\text{CO}_2$  равной 30 %. Далее определяли физико-механические характеристики образцов по стандартным методикам.

**Основная часть.** Первым этапом для внедрения нового материала в технологию струйной 3D печати является подбор порошка с определенными свойствами, к которым относится способность осаждаться, зависящая от размера и формы частиц. Размер частиц влияет на толщи-

ну формируемого слоя, а также способ нанесения порошка – для частиц 20 мкм и более предпочтительно осаждение в сухом состоянии, тогда как частицы 5 микрон и менее могут осаждаться в сухом или влажном состоянии [20]. Установлено, что для струйной технологии форма частиц менее важна, чем размер, но порошки со сферическими частицами имеют низкое внутреннее трение и соответственно легче распределяются в слое, а анизотропные порошки обладают повышенным внутренним трением, что снижает растекаемость порошков, но может увеличить коэффициент упаковки [21]. Поэтому для исследуемого порошка вяжущего был проведен лазерный анализ размера частиц на оборудовании ParticaLA-960 (Horiba). На рисунке 1 представлены результаты анализа, из которых следует, что пушенка кальциевая в основном состоит из частиц размером от 4 до 80 мкм. Частицы размером от 10 до 30 мкм составляют 82,2 % гранулометрического состава порошка. Средний геометрический размер частиц составляет 15,5 мкм.

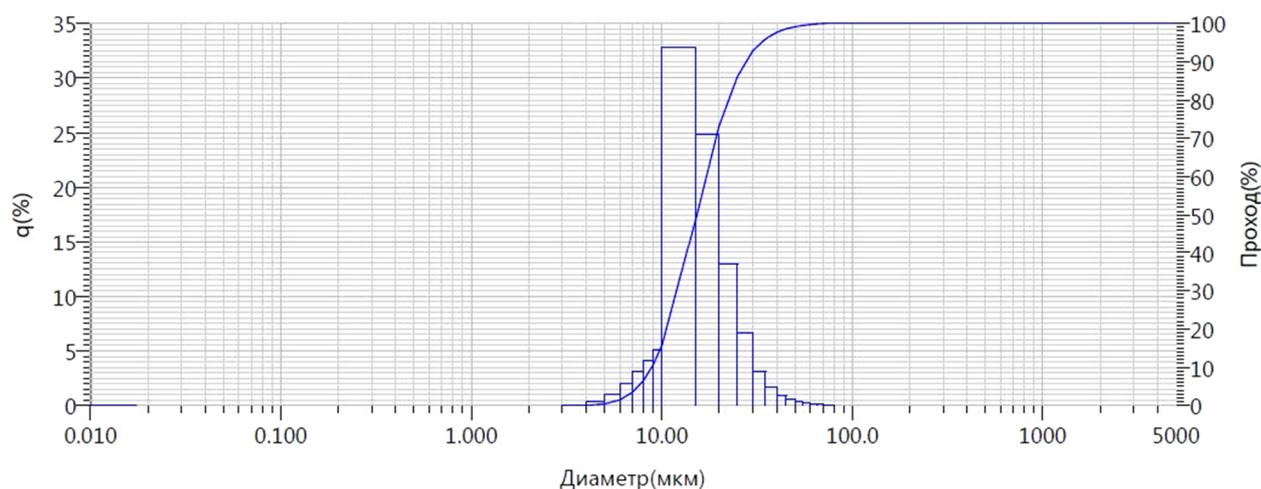


Рис. 1. Дисперсный состав и кривая частичных и полных остатков частиц пушенки кальциевой

Данные лазерного анализа размера частиц позволяют сделать вывод о пригодности порошка пушенки кальциевой для использования в струйной 3D печати. Результаты определения клеящей способности растворов связующих показали, что раствор сахарной пудры наиболее эффективен с точки зрения получения твердого слоя распределенного порошка уже после пяти минут распыления связующего. При этом эффективность раствора сахарной пудры возрастает с увеличением массовой доли сахара в растворе. Растворы связующих на основе метилгидроксипропилцеллюлозы и поливинилацетатного клея показали меньшую эффективность по клеящей способности и времени получения

твердого слоя обработанного порошка вяжущего, однако также оказались пригодны для использования в качестве растворов связующих для данного порошка вяжущего. Эффективность их работы для получения твердого слоя порошка также повышается с увеличением их массовой доли в растворе.

Искусственную карбонизацию опытных образцов-цилиндров, полученных из порошковой основы пушенки кальциевой и растворов связующих осуществляли в специально разработанной камере без избыточного давления и повышения температуры. Концентрация  $\text{CO}_2$  в камере карбонизации поддерживалась в диапазоне 30–35 %. Время карбонизации для всех образцов

составляло 90 мин. По истечении времени карбонизации образцы высушивали до постоянной массы, после чего определяли их свойства – прочность на сжатие,  $R_{сж}$ , среднюю плотность,  $\rho_0$ , и водостойкость,  $K_p$ . Испытания на прочность на сжатие опытных образцов проводили на автоматической системе испытаний на базе консоли управления МСС8 (Controls). Результаты испытаний представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Анализируя значения исследуемых свойств опытных образцов до и после искусственной

карбонизации табл. 1, рис. 2 можно сделать вывод, что процесс активной карбонизации проходит для всех видов связующих, о чем свидетельствует увеличение средней плотности, прочности при сжатии карбонизированных образцов от 4 до 32 раз в сравнении с образцами без карбонизации. Однако необходимо отметить, что увеличение массовой доли всех связующих в растворе снижает эффективность протекания химической реакции карбонизации или вовсе останавливает ее.

Таблица 1

**Физико-механические свойства опытных образцов на различных связующих до и после карбонизации**

Наименование добавки	Массовая доля добавки в растворе, %	После карбонизации				До карбонизации	
		$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа	W, %	$K_p$	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа
Сахар	15	1165	9,1	44,4	0,47	997	1,5
	25	1221	11,7	38,1	0,44	1041	2,6
	45	1103	1,8	-	-	1098	1,9
МГПЦ	0,1	1107	9,7	44,0	0,53	916	0,3
	0,5	991	1,4	-	-	958	1,0
ПВА	2	1104	11,8	43,4	0,71	932	0,7
	6	1120	9,1	45,7	0,54	926	0,6

Так, увеличение массовой доли сахарной пудры в растворе до 45 % приводит к прекращению процесса карбонизации опытных образцов, о чем свидетельствует стабильность свойств до и после процесса. Также эти образцы склонны к растрескиванию в процессе сушки за счет образования твердых кристаллов избытка сахарозы

из объемных гидратных оболочек, а образцы, помещенные в воду для определения водопоглощения и коэффициента размягчения, полностью разрушились. Наиболее эффективная работа данного вида связующего наблюдается при его массовой доле в растворе в пределах 25–30 %.

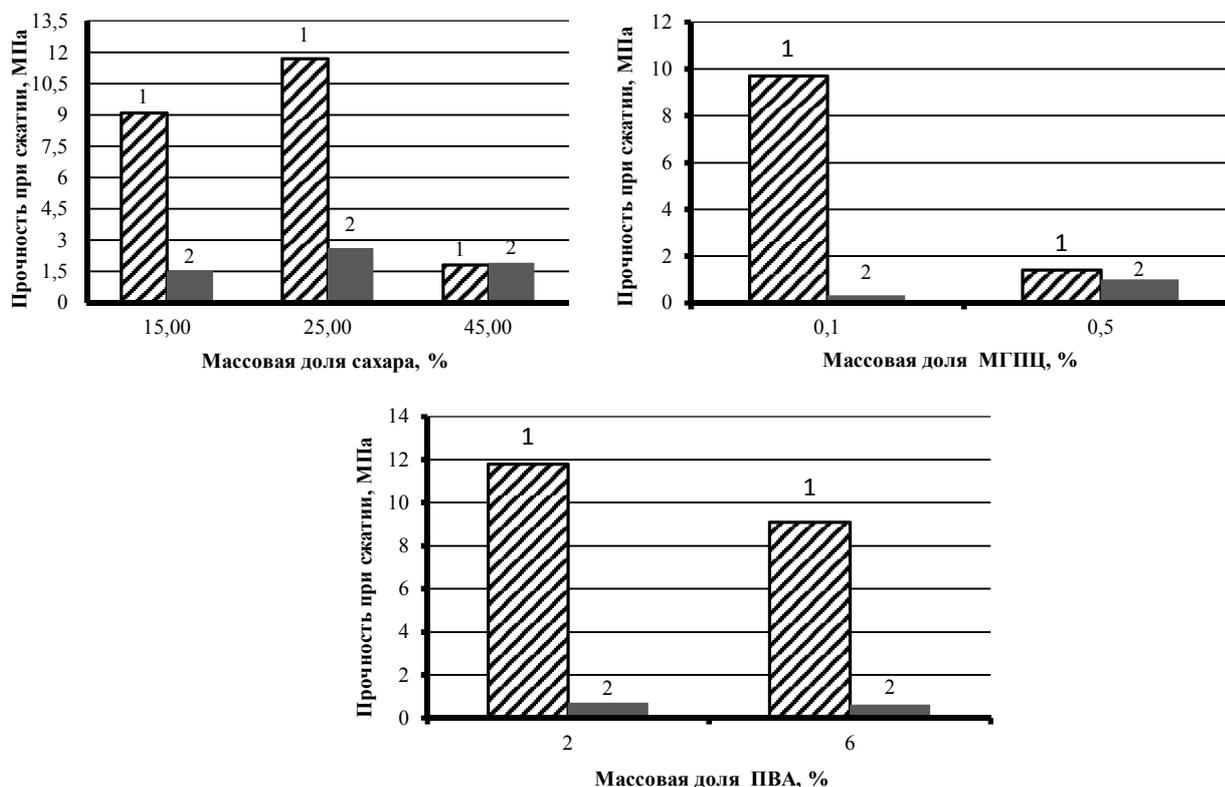


Рис. 2. Изменение прочности при сжатии образцов до и после карбонизации в зависимости от вида связующего и его массовой доли в растворе: 1 – после карбонизации; 2 – до карбонизации

Аналогичным образом ведет себя связующее МГПЦ. Если увеличение его массовой доли в растворе повышает клеящую способность, то прочность при сжатии карбонизированных образцов практически не отличается от прочности некарбонизированных (см. рис. 2), а образцы в воде также разрушаются при его содержании 0,5 % (см. табл. 1). В случае применения связующего на основе ПВА образцы в воде не разрушаются, однако увеличение массовой доли сверх 6 % способствует снижению эффективности процесса карбонизации. Оптимальное содержание связующего на основе ПВА находится в пределах 2–3 %. Необходимо отметить, что опытные образцы не подверженные искусственной карбонизации при испытании их на водопоглощение полностью разрушаются, что говорит об отсутствии водостойкости независимо от вида применяемого связующего.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что искусственная карбонизация образцов полученных на различных видах связующих в течение 90 мин способствует формированию достаточно прочной структуры из нерастворимого карбоната кальция – продукта карбонизации гидратной извести, а степень карбонизации зависит от вида связующего и его массовой доли в растворе. Наиболее эффективными видами связующих оказались растворы сахарной пудры и ПВА с массовой долей 25–30 % и 2–3 % соответственно.

Таким образом, с позиции обеспечения получения материалов с достаточными физико-механическими свойствами в результате проведенных исследований подтверждена возможность получения карбонизированного материала методом струйной 3D печати при определенных оптимальных содержаниях, исследуемых связующих в растворе.

*Источник финансирования.* Российский фонд фундаментальных исследований и Министерство образования и науки Республики Крым, в рамках научного проекта 18-48-910004.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry // *Automation in Construction*. 2016. Vol. 68. Pp.21–31.
2. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution // *Business Horizons*. 2012. Vol. 55. Issue 2. Pp. 155–162.
3. Chergui A., Hadj-Hamou K., Vignat F. Productionscheduling and nesting in additive manufacturing // *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 126. Pp. 292–301.
4. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites. Part B* 143 (2018) 172–196.
5. Wong K.V., Hernandez A. A review of additive manufacturing // *ISRN Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–10.
6. Petrovic V., Vicente Haro Gonzalez J., Jorda Ferrando O., Delgado Gordillo J., Ramon Blasco Puchades J., Portoles Grinan L. Additive layered manufacturing :sectors of industrial application shown through case studies // *International Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49 (4). Pp. 1061–1079.
7. Chan H.K., Griffin J., Lim J.J., Zeng F., Chiu A.S.F. The impact of 3D Printing technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives // *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 205. Pp. 156–162.
8. Lu K., Reynolds W.T. 3DP process for fine mesh structure printing // *Powder Technology*. 2008. Vol. 187. Pp. 11–18.
9. Utela B., Storti D., Anderson R., Ganter M. 2008. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP) // *Journal of Manufacturing Processes*. 2008. Vol. 10. Pp. 96–104.
10. Candi Marina, Beltagui Ahmad Effective use of 3D printing in the innovation process. *Technovation Available online*, 7 June 2018.
11. Impens David, Urbanic R.J. Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components // *IFAC-Papers On Line*. 2015. Volume 48. Issue 3. Pp.т652–657.
12. Li N., Huanga S., Zhanga G., Qina R., Liua W., Xionga H., Shib G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. 2019. Vol. 35. Pp. 242–269.
13. Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 1997. Vol. 5. Pp. 427–437.
14. Anjum T., Dongre P., Misbah F., Nanyam N. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. 2017. *Procedia Engineering*. Vol. 196. Pp. 228–235.
15. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorp T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. Pp. 262–268.
16. Rael R. 3D printing powder composition and methods of use. United States: U.S. Patent and Trademark Office, The Regents Of The University Of California. WO2013043908A1; 2012.

17. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 365 (2018) 032032. doi:10.1088/1757-899X/365/3/032032.

18. Lyubomirskiy N.V., Fic S., Fedorkin S.I. Investigation of Physical and Mechanical Properties of Construction Materials of Forced Carbonate Hardening // Materials Science Forum «Materials and Technologies in Construction and Architecture», International Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice of Industry Development (CATPID 2018), 2018, Vol. 931, Pp. 475–480.

19. Lyubomirskiy N., Fedorkin S.I., Bakhtin A.S., Bakhtina T.A. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials // Malaysian Construction Research Journal. 2017. Volume 23. No. 3. Pp. 15–26.

20. Sachs E.M. Powder dispensing apparatus using vibration. United States: U.S. Patent and Trademark Office, Massachusetts Institute of Technology. 6,036,777;2000.

21. Cima M, Sachs E, Fan T, et al. Three-dimensional printing techniques. United States: U.S. Patent and Trademark Office, Massachusetts Institute of Technology. 5,387,380;1995.

*Поступила в февраль 2019 г.*

© Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко Е.Ю., 2019

*Информация об авторах*

**Бахтина Тамара Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения. E-mail: t.bakhtina83@gmail.com. Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение). Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. Россия, Республика Крым, 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.

**Любомирский Николай Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Академии строительства и архитектуры, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения. E-mail: niklub.ua@gmail.com. Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение). Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. Россия, Республика Крым, 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.

**Бахтин Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения. Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение). E-mail: aleserba@gmail.com. Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение). Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. Россия, Республика Крым, 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.

**Николаенко Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения. Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение). E-mail: lesha29.04@mail.ru. Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. Россия, Республика Крым, 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.

<sup>1,\*</sup>*Bakhtina T.A., <sup>1</sup>Lyubomirskiy N.V., <sup>1</sup>Bakhtin A.S., <sup>1</sup>Nikolaenko E.Yu.*

<sup>1</sup>*V.I. Vernadsky Crimean Federal University.*

*Russia, 295007, Simferopol, st.Academic Vernadsky, 4.*

*\*E-mail: t.bakhtina83@gmail.com*

## DEVELOPMENT OF A MATERIAL BASED ON LIME-CARBONATE AND CALCIUM COMPOSITIONS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

**Abstract.** *The results of experimental studies to determine the possibility of obtaining carbonized material based on lime-carbonate-calcium compositions using inkjet 3D printing are presented. Some types of materials used as connecting for inorganic binders have been studied. An effective method of hardening the model obtained in the process of 3D printing is determined. The physicomechanical characteristics of prototypes solidified in an environment of high concentration of carbon dioxide are defined. It has been established that artificial carbonization of samples obtained on various types of binders for 90 minutes contributes to the formation of a sufficiently strong structure from insoluble calcium carbonate, a product of carbonation of hydrated lime. In this case, the degree of carbonization depends on the type of binder and its mass fraction in solution. The most effective types of binders are selected and the optimal content of the*

*binders in solution is determined. In result, to ensure the production of materials with sufficient physico-mechanical properties, a possibility of obtaining carbonized material by the method of 3D inkjet printing at certain optimal contents of the tested binders is confirmed.*

**Keywords:** *additive technologies, carbon dioxide, lime-carbonate systems, carbonate hardening.*

## REFERENCES

1. Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 68. Pp. 21–31.
2. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012. Vol. 55. Issue 2. Pp. 155–162.
3. Chergui A., Hadj-Hamou K., Vignat F. Productionscheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 126. Pp. 292–301.
4. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites. Part B* 143 (2018) 172–196.
5. Wong K.V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–10.
6. Petrovic V., Vicente Haro Gonzalez J., Jorda Ferrando O., Delgado Gordillo J., Ramon Blasco Puchades J., Portoles Grinan L. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49 (4). Pp. 1061–1079.
7. Chan H.K., Griffin J., Lim J.J., Zeng F., Chiu A.S.F. The impact of 3D Printing technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 205. Pp. 156–162.
8. Lu K., Reynolds W.T. 3DP process for fine mesh structure printing. *Powder Technology*. 2008. Vol. 187. Pp. 11–18.
9. Utela B., Storti D., Anderson R., Ganter M. 2008. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*. 2008. Vol. 10. Pp. 96–104.
10. Candi Marina, Beltagui Ahmad Effective use of 3D printing in the innovation process. *Technovation* Available online, 7 June 2018.
11. Impens David, Urbanic R.J. Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components. *IFAC-Papers On Line*. 2015. Vol. 48. Iss. 3. Pp. 652–657.
12. Li N., Huang S., Zhanga G., Qina R., Liua W., Xionga H., Shib G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019. Vol. 35. Pp. 242–269.
13. Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*. 1997. Vol. 5. Pp. 427–437.
14. Anjum T., Dongre P., Misbah F., Nanyam N. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. 2017. *Procedia Engineering*. Vol. 196. Pp. 228–235.
15. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorp T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. Pp. 262–268.
16. Rael R. 3D printing powder composition and methods of use. United States: U.S. Patent and Trademark Office, The Regents Of The University Of California. WO2013043908A1; 2012.
17. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365 032032. doi:10.1088/1757-899X/365/3/032032.
18. Lyubomirskiy N.V., Fic S., Fedorkin S.I. Investigation of Physical and Mechanical Properties of Construction Materials of Forced Carbonate Hardening. *Materials Science Forum «Materials and Technologies in Construction and Architecture»*, International Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice of Industry Development (CATPID 2018). 2018. Vol. 931. Pp. 475–480.
19. Lyubomirskiy N., Fedorkin S.I., Bakhtin A.S., Bakhtina T.A. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials. *Malaysian Construction Research Journal*. 2017. Vol. 23. No. 3. Pp. 15–26.
20. Sachs E.M. Powder dispensing apparatus using vibration. United States: U.S. Patent and Trademark Office, Massachusetts Institute of Technology. 6, 036, 777; 2000.
21. Cima M, Sachs E, Fan T, et al. Three-dimensional printing techniques. United States: U.S. Patent and Trademark Office, Massachusetts Institute of Technology. 5, 387, 380; 1995.

### Information about the authors

**Bakhtina, Tamara A.** PhD, Assistant professor. E-mail: t.bakhtina83@gmail.com. Academy of Construction and Architecture of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Russia, 295493, Simferopol, Kievskaya St., 181.

**Lyubomirskiy, Nikolay V.** DSc, Professor. Academy of Construction and Architecture of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Russia, 295493, Simferopol, Kievskaya St., 181. E-mail: niklub.ua@gmail.com

**Bakhtin, Aleksandr S.** PhD, Assistant professor. E-mail: aleserba@gmail.com. Academy of Construction and Architecture of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Russia, 295493, Simferopol, Kievskaya St., 181.

**Nikolaenko, Elena Yu** PhD. Assistant professor. E-mail: lesha29.04@mail.ru. Academy of Construction and Architecture of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Russia, 295493, Simferopol, Kievskaya St., 181.

---

*Received in February 2019*

**Для цитирования:**

Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко Е.Ю. Разработка материала на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций для аддитивных технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 9–15. DOI: 10.34031/article\_5cb1e65917fd15.03058522

**For citation:**

Bakhtina T.A., Lyubomirskiy N.V., Bakhtin A.S., Nikolaenko E.Yu. Development of a material based on lime-carbonate and calcium compositions for additive technologies. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 9–15. DOI: 10.34031/article\_5cb1e65917fd15.03058522

-