

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-1-74-81

**Морева И.Ю., Вареникова Т.А., *Кириллова Н.К., Дороганов В.А.,
Лебедев М.С., Евтушенко Е.И., Шакурова Н.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: kirillova_nk@edu.bstu.ru

К ВОЗМОЖНОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ СИЛИКАТНЫМИ МАССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЕРАМИЧЕСКИХ И ГИДРАТАЦИОННЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Аннотация. Технологии 3D-печати появились достаточно давно и успешно применяются в ряде производств. Так, без их использования уже практически не обходится деятельность многих передовых компаний по созданию макетов, моделей и прототипов узлов, агрегатов, изделий и т.д. На очереди технологии серийного производства, обладающие высокой производительностью в сочетании с низкой себестоимостью, сопоставимой с традиционными способами изготовления изделий. Производство различных изделий из силикатных масс аддитивным способом серьезно сдерживается рядом проблем, обусловленными спецификой самого материала. Одна из главных - достижение высоких физико-механических характеристик возможно только после гидратации (для цементов) или термической обработки (керамические массы) изделия. Значительное влияние оказывает способ изготовления изделия, наиболее удобным и наименее энергозатратным способом (в сравнении с порошковыми способами 3D-печати с использованием лазерного спекания) представляется послойное литье шликером или экструзия пластической массой, однако и здесь есть нерешенные проблемы. В данной работе освещены ключевые проблемы применения аддитивного способа производства конструкционных изделий на керамических и гидратационных связках с использованием пластичных и жестких масс в сочетании с вибрационными воздействиями.

Ключевые слова: трехмерная печать, аддитивный способ производства, конструкционные изделия, керамические связующие (глина), гидратационные вяжущие (портландцемент), жесткие массы.

Введение. В настоящее время создание современных конструкционных изделий различного назначения серьезно сдерживается развитием потенциала традиционных технологий. Привычные способы производства зачастую не могут обеспечить сочетания высоких физико-механических свойств (термостойкость, легкость, прочность) со сложными геометрическими конфигурациями. Так, керамические материалы сложной формы востребованы в машиностроении, в конструкциях газотурбинных двигателей, в медицине для создания ортопедических изделий, имплантов, в химической промышленности для получения коррозионно-стойкой огнеупорной посуды, тиглей, элементов котлов и реакторов, наконец, в производстве бытовых и декоративных керамических изделий. Актуальными являются исследования с использованием гидратационных вяжущих. Это могут быть портландцементные растворы и бетоны, а также огнеупорные материалы на глиноземистых и высокоглиноземистых цементах. Наиболее перспективным способом производства в этом отношении безусловно является трехмерная печать, однако существует ряд барьеров, препятствующих развитию производства изделий аддитивным способом [1].

Глобально аддитивные процессы можно разделить на два типа:

1. Одношаговые процессы, в которых изделие или его часть производится единичной операцией, формирование нужных геометрических и физико-механических параметров материала происходит сразу;

2. Так называемые «непрямые» процессы, которые включают две и более операции для получения изделия заданной формы и свойств.

Производство керамики аддитивным способом в абсолютном большинстве случаев относится ко второму типу процессов и основано на использовании различных связующих для консолидации частиц керамического порошка. Разнообразные технологические приемы позволяют получать широкий спектр керамических изделий, однако всегда требуют энергозатратного этапа по отжигу связующего и, соответственно, не относятся к быстрым способам печати [2].

Достижение высоких физико-химических свойств керамики в значительной степени зависит от микроструктуры изделия, которая формируется и изменяется на каждой стадии технологического цикла от подготовки сырья до ключевого процесса – спекания. Формование керамических деталей методами быстрого прототипирования по первому типу процессов имеет существенные ограничения. Тонкие керамические порошки, используемые в аддитивных процессах, склонны к агломерации и накоплению электростатического заряда, вследствие чего снижается плотность упаковки частиц. Пористость изделия

может увеличиваться и на следующей стадии при удалении связующего. Применение лазерных технологий спекания (плавления) порошкообразных материалов при трехмерной печати керамики заведомо не обеспечивает оптимизацию микроструктуры и фазового состава готового изделия. Высокие градиенты нагрева создают существенные напряжения в структуре, которые возможно снять только через дополнительный отжиг, а кратковременное воздействие лазерного излучения не может обеспечить полноценное формирование жидкой фазы [3].

Единственным одношаговым способом 3D-печати керамики является метод, в котором порошок наносится послойно, и поверхность каждого слоя расплавляется тепловой энергией (powder bed fusion - синтез на подложке), разновидностью являются селективное лазерное плавление (SLM – Selective Laser Melting) и селективное лазерное спекание (SLS – Selective Laser Sintering). Эти способы являются более быстрыми и эффективными в сравнении с непрямыми, однако пока не могут обеспечить необходимый широкий ассортимент изделий. Другой существенной проблемой при использовании этих методов является растрескивание изделий из-за термического шока от лазерного излучения. Особенности процессов лазерного спекания керамики раскрыты в работе [4, 5].

Пористость и низкая плотность изделий является общей проблемой для всех аддитивных процессов, и может быть решена оптимизацией технологических параметров непосредственно при формировании изделий, или дополнительными операциями после [6].

В традиционных способах получения керамических материалов плотность готового изделия во многом определяется плотностью полуфабриката, поэтому разработка технологических приемов, позволяющих формировать плотные слои и обеспечивать их консолидацию, остается актуальной задачей во всех сферах аддитивного производства.

В 2002 г. немецкими учеными был запатентован метод, сочетающий литьевые технологии и лазерное спекание, который известен как Layerwise Slurry Deposition – LSD (послойное шликерное осаждение). В работах [7, 8] методом LSD получены образцы фарфора, литиевых стекол, стеклокерамики с высокими физико-механическими свойствами. Техника стереолитографии основана на фотополимеризации жидких смол, наполненных керамическими частицами (до 40-60 % по объему) [9]. Такой способ позволяет получать полуфабрикат с высокой истинной плотностью ($2,56 \text{ г/см}^3$) и конечной плотностью после

спекания 99 % (данные приведены для образцов из порошка Al_2O_3) [10].

Очень мало работ посвящено развитию трехмерной печати с использованием керамических шликеров на водной основе [11]. В этом случае могут быть использованы классические приемы приготовления суспензий с применением порошков с размерами частиц от 100 нм до 100 мкм. Важным преимуществом является возможность контроля межчастичного взаимодействия, а подвижность частиц в шликере определяет их свободное размещение с предпосылкой получения оптимальной структуры.

Можно уверенно говорить о том, что с точки зрения формирования оптимальной микроструктуры полуфабриката в традиционном производстве приоритетными являются «влажные» способы формования – литье, экструзия. Однако при использовании водных керамических шликеров и масс в 3D-принтерах необходимо достижение таких реотехнологических характеристик, которые будут обеспечивать высокую степень пластичности, способность к формообразованию даже сложных изделий, и одновременно высокую пластическую прочность и малоусадочность изделий. Немаловажным при этом является процесс сцепления слоев между собой. Наиболее удобным и наименее энергозатратным способом представляется послойное литье шликером или экструзия пластической массой. Однако требуется детальное изучение межчастичного взаимодействия с учетом влажности, плотности суспензии, скорости движения печатающего устройства и др. При использовании керамических порошков и жестких масс эффективными могут быть технологические приемы, связанные с вибрационным воздействием. Эффективным может стать использование безобжиговых технологий получения керамических (огнеупорных) изделий.

Еще одно перспективное направление аддитивных технологий – организация компьютеризированного изготовления конструкционных изделий, а также строительного процесса с помощью 3D-печати. Так, крупнейший игрок на рынке строительной печати Countour Crafting Corp применяют растворы на основе сульфатостойкого цемента и песка с использованием пластификаторов на поликарбоксилатной основе и полипропиленовых фибровых волокон [12].

Из российских компаний, занимающихся строительной печатью, наиболее известными являются ApisCor и АМТ-СПЕЦАВИА. Принтер компании ApisCor представляет собой безрамную моноопорную конструкцию с печатающей головкой кранового типа, что обеспечивает простоту монтажа. Размеры печати ограничены и

разработчики представили минимальные требования к ним: класс по прочности на сжатие бетона – не менее B20, марка по морозостойкости – не менее F200, марка по водонепроницаемости – не менее W6, марка по средней плотности – не ниже D2000 [13]. В г. Ступино ArisCor [14] напечатали дом площадью 38 м² в феврале 2017 г, а в октябре того же года АМТ-СПЕЦАВИА представила жилой дом, изготовленный методом аддитивной печати, по сборочно-модульной технологии. Компания применяет как специализированные цементные смеси, так и традиционный мелкозернистый бетон марки М300. Программное обеспечение и строительный принтер являются универсальными в применении [15].

Самым высоким зданием, построенным по аддитивным технологиям, считается 5-этажное здание, построенное китайской компанией Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co [16]. Также в г. Дубай представлен офис будущего, построенный по аддитивным технологиям WinSun. На сегодняшний день в сфере аддитивной печати зданий самой передовой является система D-Shape, которая использует стереолитографический печатный процесс, который позволяет создать полноразмерные объекты из песка [17].

Точное соблюдение технологии при печати непосредственно на строительной площадке – довольно сложная задача. В связи с этим большее развитие получили технологии, в которых возводимый объект разбивается на элементы-модули, печатающиеся на организованном стационарном производстве. Конечная сборка элементов проводится на строительной площадке.

Приведенные выше примеры различных отечественных и зарубежных технологий 3D-печати в строительстве говорят о высокой заинтересованности ученых всех стран в развитии данных отраслей. Открытыми до сих пор остаются вопросы высокой себестоимости изделий при низкой производительности оборудования. Наряду с отсутствием нормативной и законодательной базы для конструктивных элементов и строительства зданий, актуальными являются исследования и технологические разработки, направленные на решение задач по повышению подвижности строительных смесей (для их подачи на расстоянии до нескольких сотен метров и обеспечения адгезии между слоями), повышению скорости твердения массы сразу после формовки, улучшению технологичности процесса, повышению качества изделий и т.д. [18].

Материалы и методы. В качестве сырьевых материалов в экспериментальной части керамических масс использована глина Латненского месторождения (ЛТ-1) (Воронежская область). В

соответствии с ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний» были определены пластические и формовочные свойства, коэффициент чувствительности к сушке, воздушная усадка глины. Физико-механические свойства определены согласно ГОСТ 7025-91 «Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости», ГОСТ 8462-85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе».

В качестве сырьевых материалов бетонных масс использованы бетоны на мелкозернистых (заполнитель – песок) и тяжелых (заполнитель – песок или отсев дробления щебня и щебень – с размером до 10 мм). Портландцемент использовался марки ПЦ 500-Д0. Физико-механические характеристики определены согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 12730.1-78 «Бетоны. Методы определения плотности».

Основная часть. Целью данной работы было изучение возможности использования пластичных и жестких масс на керамических и гидратационных связующих (глина, портландцемент, высокоглиноземистый цемент) с использованием вибрационных воздействий.

Керамические связующие. На первом этапе работы были изучены массы, обладающие типично тиксотропным характером течения и при определенной влажности – высокой пластической прочностью. Принципиальная возможность получения керамических изделий путем 3D-печати осуществлялась с использованием глины Латненского месторождения (ЛТ-1), которая относится к огнеупорным, среднепластичным глинам (число пластичности – 15), с коэффициентом чувствительности к сушке – 1,1 и воздушной линейной усадкой – 5,8 %. Формовочная влажность этой глины около 18 %, поэтому массу для транспортировки к точке формования готовили в грануляторе, с подбором оптимальной формовочной влажности полужестких масс в интервале от 12 до 18 %. Формование осуществлялось с использованием вибрационных воздействий по поверхности (виброскорость 11–100 м/с), создаваемых вибратором мощностью около 20 Вт и массой 2,6 кг.

В ходе выполненного эксперимента установлено, что образцы сырца на естественных керамических связующих, полученные аддитивным способом при влажности массы около 16 %, практически не уступают по основным физико-механическим свойствам контрольным, сформованным на прессе. Результаты представлены в таблице 1.

Образцы, полученные по 3D-технологии, после обжига имеют плотную, спеченную структуру, однако в некоторых местах имеет место расслоение, связанное, вероятно, с недостаточным закреплением слоев между собой во время

формования. Однако, дополнительные мероприятия по упрочнению контактного слоя путем разрыхления или создания заданного рельефа на свежотформованном слое способны решить эту проблему.

Таблица 1

Физико-механические характеристики образцов, полученных различными способами

Характеристика	Контроль (пластическое формование) ($W_{\text{массы}}=16\%$)	Образцы, полученные аддитивным способом ($W_{\text{массы}}=16\%$)
Плотность после сушки, г/см ³	2,03	1,96
Воздушная усадка, %	5,8	5,3
Прочность сырца, МПа	5	5
Предел прочности при сжатии после термической обработки, МПа	20	20

Гидратационные связующие. Исследования проводились на мелкозернистых (заполнитель – песок) и тяжелых (заполнитель – песок или отсев дробления щебня и щебень - с размером до 10 мм) бетонах. После послойной печати полученный композит помещался в условия для нормального твердения – температура 20 ± 2 °С и относительная влажность окружающего воздуха не менее 90 %. По истечении 28 суток образцы бетона (рис. 1) распиливались на стандартные балочки $4\times 4\times 16$ см (с определенной погрешностью), для которых определялись объем, средняя

плотность и прочностные показатели на изгиб и сжатие. Разработанные составы и свойства бетонных образцов представлены в таблице 2.

Пригодность состава для трехмерной печати оценивали по двум ключевым факторам: 1 – Фактор связности, т.е. способность растекаться без нарушения сплошности, что придает массе в первую очередь цементное тесто; 2 – Фактор пластической прочности для дальнейшей печати.

Таблица 2

Составы и физико-механические характеристики бетонных образцов, полученных по технологии трехмерной печати

№ состава	1	2	3	4	5	6
Портландцемент	50	50	30	30	20	25
Песок	50	50	–	–	–	25
Отсев дробления	–	–	30	30	40	–
Щебень	–	–	40	40	40	50
Вода*	17,5	15	9	10,5	7,5	9
Средняя плотность, кг/м ³	2166	2180	2185	2317	2161	2445
Пористость, %	16,3	15,3	18,1	12,2	18,5	7,4
Прочность (марка) на растяжение при изгибе, МПа	5,2 ($B_{\text{тб}}4,0$)	7,24 ($B_{\text{тб}}5,6$)	4,3 ($B_{\text{тб}}3,2$)	5,6 ($B_{\text{тб}}4,4$)	3,68 ($B_{\text{тб}}2,8$)	5,86 ($B_{\text{тб}}4,4$)
Прочность (марка) на сжатие, МПа	27,5 (M250)	33,62 (M350)	22,88 (M200)	34,36 (M350)	19,74 (M200)	36,40 (M350)

*Содержание воды сверх 100 % твердой фазы

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что по технологическим характеристикам (сохранение формы и необходимой пластической прочности изделия при послойной печати) и физико-механическим свойствам наиболее эффективными являются составы 2, 4 и 6. Достаточную

для сохранения формы и нанесения последующих слоев прочность удалось получить только при 50 % содержании заполнителя размером до 10 мм и общей влажности массы до 10 %.

Дальнейшими исследованиями будут разработаны и другие составы с различным содержанием компонентов.



Рис. 1. Образец бетона, полученный по технологии трехмерной печати

Выводы. Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность прямого использования жестких печатных масс на керамических и гидратационных связующих. Установлено, что в зависимости от дисперсного состава могут применяться составы с влажностью 9–18 %, обеспечивающей их удобоукладываемость при вибрационных воздействиях и необходимую пластическую прочность для непрерывного процесса печати. В результате выполненных работ методом трехмерной печати получены образцы керамических и бетонных материалов. Показано, что аддитивный способ прямой печати силикатных изделий хотя и имеет свои недостатки, но при использовании некоторых технологических приемов и грамотном подборе технологических характеристик массы позволяет получать образцы сложной формы с требуемыми характеристиками. При этом общая производительность 3D-печати жесткими массами может быть многократно превышена в сравнении с литьевыми составами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength. *Journal European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. Issue. 15. Pp. 4833–4842.
2. Minas C., Carnelli D., Tervoort E., Studart Ar. 3D printing of emulsions and foams into hierarchical porous ceramics. *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. Issue. 45. Pp. 9993–9999. DOI: 10.1002/adma.201603390.
3. 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: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
4. Qian B., Shen Z. Laser sintering of ceramics. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2013. Vol. 1. Issue. 4. Pp. 315–321. DOI:10.1016/j.jascer.2013.08.004.
5. Mühler T., Gomes C.M., Heinrich J., Günster J. Slurry-based additive manufacturing of ceramics *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2015. Vol. 12. Issue. 1. Pp. 18–25. DOI: 10.1111/ijac.12113
6. Deckers J., Vleugels J., Kruth J.-P. Additive manufacturing of ceramics. A review. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2014. Vol. 5. No. 4. Pp. 245–260. DOI: 10.4416/JCST2014-00032.
7. Gahler A., Heinrich J. G., Gunster J. Direct laser sintering of Al₂O₃–SiO₂ dental ceramic components by layer-wise slurry deposition. *Journal of American Ceramic Societies*. 2006. Vol. 89. Issue. 10. Pp. 3076–3080. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01217.
8. Tian X., Muhler T., Gomes C., Gunster J., Heinrich J. G. Feasibility study on rapid prototyping of porcelain products. *Journal of Ceramic Science Technology*. 2011. Vol. 2. No. 4. Pp. 217–225. DOI: 10.4416/JCST2011-00038.
9. Zocca A., Colombo P., Gomes C.M., Gunster J. Additive manufacturing of ceramics: Issues, potentialities and opportunities. *Journal of American Ceramic Societies*. 2015. Vol. 98. Issue. 7. Pp. 1983–2001. DOI: 10.1111/jace.13700
10. Kirihara S. Creation of functional ceramic structure by using stereolithographic 3D printing. *Joining and Welding Research Institute*. 2014. Vol. 43. No. 1. Pp. 5–10.
11. Yen H. C. Experimental studying on development of slurry-layer casting system for additive manufacturing of ceramics. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 77. Pp. 915–925. DOI: 10.1007/s00170-014-6534-8.
12. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific

strength. Journal European Ceramic Society. 2017. Vol. 37. Issue. 15. Pp. 4833–4842.

13. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7. С. 863–876.

14. Apis Cor. We print buildings [Электронный ресурс]. URL: <https://www.apis-cor.com/> (Дата обращения: 18.02.2020).

15. Максимов Н.М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы // Аддитивные технологии. 2014. №4. С. 54-62.

16. Winsun. Future of Construction [Электронный ресурс]. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (Дата обращения: 01.02.2020).

17. Jakupovic A. D-Shape report [Электронный ресурс]. URL: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf> (Дата обращения: 08.02.2020).

18. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 6-13. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178.

Информация об авторах

Морева Ирина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: moreva_bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Вареникова Татьяна Анатольевна, ведущий инженер кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: varenikova.t@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кириллова Наталья Константиновна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: kirillova_nk@edu.bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лебедев Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий инженер центра высоких технологий. E-mail: michaelL1987@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Евтушенко Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: evviv@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шакурова Наталия Васильевна, магистрант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.03.2020

© Морева И.Ю., Вареникова Т.А., Кириллова Н.К., Дороганов В.А., Лебедев М.С., Евтушенко Е.И., Шакурова Н.В., 2021

*Moreva I.Y., Varenikova T.A., *Kirillova N.K., Doroganov V.A.,
Lebedev M.S., Evtushenko E.I., Shakurova N.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: kirillova_nk@edu.bstu.ru

THE POSSIBILITY OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING WITH SILICATE MASSES USING CERAMIC AND HYDRATION BINDERS

Abstract. The 3D printing technologies have appeared for a long time and are successfully used in a number of industries. The activities of many leading companies in the creation of layouts, models and prototypes of units, assemblies, products are practically not carried out without the use of 3D printing. The following

are batch production technologies with high productivity combined with low cost, comparable to traditional methods of manufacturing products. The production of various products from silicate masses in an additive manner is seriously constrained by a number of issues due to the specifics of the material itself. One of them - achieving high physical and mechanical characteristics is possible only after hydration (for cements) or heat treatment (ceramic masses) of the product. Significant influence is exerted by the method of manufacturing the product. The most convenient and least energy-consuming method (in comparison with the powder 3D printing methods using laser sintering) is layer-by-layer slip casting or plastic extrusion, however, there are some unresolved problems. This paper highlights the key problems of using the additive method of manufacturing structural products on ceramic and hydration bonds using plastic and rigid masses in combination with vibration effects.

Keywords: 3D-printing, additive manufacturing method, structural products, ceramic binders (clay), hydration binders (portland cement), hard masses.

REFERENCES

1. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength. *Journal European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. Issue. 15. Pp. 4833–4842.
2. Minas C., Carnelli D., Tervoort E., Studart Ar. 3D printing of emulsions and foams into hierarchical porous ceramics. *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. Issue. 45. Pp. 9993–9999. DOI: 10.1002/adma.201603390.
3. 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: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
4. Qian B., Shen Z. Laser sintering of ceramics. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2013. Vol. 1. Issue. 4. Pp. 315–321. DOI:10.1016/j.jascer.2013.08.004.
5. Mühler T., Gomes C.M., Heinrich J., Günster J. Slurry-based additive manufacturing of ceramics *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2015. Vol. 12. Issue. 1. Pp. 18-25. DOI: 10.1111/ijac.12113
6. Deckers J., Vleugels J., Kruth J.-P. Additive manufacturing of ceramics. A review. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2014. Vol. 5. No. 4. Pp. 245-260. DOI: 10.4416/JCST2014-00032.
7. Gahler A., Heinrich J. G., Gunster J. Direct laser sintering of Al₂O₃-SiO₂ dental ceramic components by layer-wise slurry deposition. *Journal of American Ceramic Societies*. 2006. Vol. 89. Issue. 10. Pp. 3076–3080. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01217.
8. Tian X., Muhler T., Gomes C., Gunster J., Heinrich J. G. Feasibility study on rapid prototyping of porcelain products. *Journal of Ceramic Science Technology*. 2011. Vol. 2. No. 4. Pp. 217–225. DOI: 10.4416/JCST2011-00038.
9. Zocca A., Colombo P., Gomes C.M., Gunster J. Additive manufacturing of ceramics: Issues, potentialities and opportunities. *Journal of American Ceramic Societies*. 2015. Vol. 98. Issue. 7. Pp. 1983–2001. DOI: 10.1111/jace.13700
10. Kirihara S. Creation of functional ceramic structure by using stereolithographic 3D printing. *Joining and Welding Research Institute*. 2014. Vol. 43. No. 1. Pp. 5–10.
11. Yen H. C. Experimental studying on development of slurry-layer casting system for additive manufacturing of ceramics. *International Journal Advanced Manufacturing*
12. Maurath J., Willenbacher N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength. *Journal European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. Issue. 15. Pp. 4833–4842.
13. Inozemcev A.S., Korolev E.V., Zuong Thanh Qui. Analysis of existing 3D printing technology solutions in construction [Analiz sushchestvuyushchih tekhnologicheskikh reshenij 3D-pechati v stroitel'stve]. *Bulletin of MGSU*. 2018. Vol. 13. No. 7. Pp. 863-876. (rus)
14. Apis Cor. We print buildings. URL: <https://www.apis-cor.com/> (date of treatment: 18.02.2020).
15. Maksimov N.M. Additive technologies in construction: equipment and materials [Additivnye tekhnologii v stroitel'stve: oborudovanie i materialy]. (rus)
16. Winsun. Future of Construction. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (date of treatment: 01.02.2020).
17. Jakupovic A. D-Shape report. URL: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf> (date of treatment: 08.02.2020).
18. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for building printing [Formirovanie svojstv kompozicij dlya stroitel'noj pechati]. *Bulletin BGTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 10. Pp. 6–13. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178. (rus)

Information about the authors

Moreva, Irina Y. PhD, Assistant professor. E-mail: moreva_bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Varenikova, Tat'yana A. Lead engineer. E-mail: varenikova.t@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kirillova, Nataliya K. Postgraduate student. E-mail: kirillova_nk@edu.bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov, Vladimir A. PhD, Assistant professor. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lebedev, Mihail S. PhD. E-mail: michael1987@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Evtushenko, Evgenij I. DSc, Professor. E-mail: eveviv@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shakurova, N.V. Master student. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 19.03.2020

Для цитирования:

Морева И.Ю., Вареникова Т.А., Кириллова Н.К., Дороганов В.А., Лебедев М.С., Евтушенко Е.И., Шакурова Н.В. К возможности трехмерной печати силикатными массами с использованием керамических и гидратационных связующих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 1. С. 74–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-1-74-81

For citation:

Moreva I.Y., Varenikova T.A., Kirillova N.K., Doroganov V.A., Lebedev M.S., Evtushenko E.I., Shakurova N.V. The possibility of three-dimensional printing with silicate masses using ceramic and hydration binders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 1. Pp. 74–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-1-74-81