

DOI: 10.34031/article_5ca1f6300a4956.62644399

¹Шорстова Е.С., ¹Клюев С.В., ¹Клюев А.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

*E-mail: klyuyev@yandex.ru

ФИБРОБЕТОН ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы возможности применения 3-D печати в строительной индустрии. Проведен анализ работ, выполненных по этому направлению в мире. Также представлены основные преимущества такого способа возведения конструкций и зданий в целом. Были проведены экспериментальные исследования с применением компонентов смеси: «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н, тонкомолотый кварцитопесчаник с удельной поверхностью 700 м²/кг с использованием гипса. В качестве мелкого заполнителя использовался песок. Для придания смеси пластичности применялись такие добавки как пластификатор ПФМ-НЛК и Mirapor Kombi 756. В качестве армирующей была использована базальтовая фибра. Были разработаны составы бетонной смеси дисперсно армированной базальтовой фиброй. В работе удалось разработать состав фибробетонной смеси, который можно использовать для 3D-печати. Были определены его прочностные характеристики, позволяющие сделать вывод о том, что данный состав соответствует всем требованиям, предъявляемым для такой технологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, строительство, 3D-печать, строительные технологии, конструкции, здания, структурная оптимизация.

Введение. В настоящее время бетон является одним из наиболее важных строительных материалов современности. Ежегодно по всему миру, предположительно, производится 8 миллиардов м³ бетона. Это означает, что примерно 1 м³ бетона производится на одного человека в год. Историю бетона как строительного материала относят к римскому периоду. Существует много способов получения высококачественных бетонных составов для строительной индустрии [9–14].

Идея печати бетона была впервые продемонстрирована Хошневисом в конце 90-х годов. С тех пор этот метод был скопирован различными научными организациями по всему миру, и значительный рост разработанных составов бетонной смеси наблюдается после 2012 года. В университете Эйндрховена проведены исследования 3D-бетонной печати с использованием технологии контурной обработки (рис. 1).



Рис. 1. Крупномасштабный бетонный принтер в Технологическом университете Эйндрховена и некоторые печатные элементы

3D-печать, потенциально, способна решать следующие проблемы:

- возможна новая степень архитектурной свободы в дизайне, поскольку принтер может легко создавать более сложные формы, без установки опалубки;

- роботизированный комплекс берет на себя тяжелую работу, и вибрация бетона больше не требуется;

- производительность может быть увеличена из-за отсутствия опалубки, и роботы могут работать непрерывно [1–3].

Трехмерная печать бетона определенно демонстрирует высокий потенциал, который может быть классифицирован на иерархические уровни. Самый высокий уровень – возводить на месте целые здания. В настоящее время это направление только начинает развиваться, поскольку качество разработанных составов бетонных смесей для

3D-печати еще не может конкурировать с традиционными бетонными структурами. Кроме того, безопасность изделий и конструкций, полученных этим способом также остается не безопасной, поскольку эти составы не достаточно изучены по прочностным и деформативным характеристикам, тем самым вопрос долговечности возводимых зданий и сооружений пока остается под вопросом.

Печать зданий и сооружений на основе бетонных составов в настоящее время в США, Канаде, Японии, Германии, Китае и во многих других странах мира находит широкое применение. Для повышения эксплуатационных характеристик смеси мы предлагаем армирование фиброй [4–8].

Методология. В ходе проведения экспериментальных исследований по выявлению оптимальных составов для печати изделий из фибробетона на 3D-принтере были использованы различные соотношения компонентов смеси [15, 16].

В качестве вяжущего применялся товарный портландцемент АО «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н и тонкокомлотый кварцитопесчаник с удельной поверхностью 700 м²/кг, гипс. В качестве мелкого заполнителя использовался песок. Для придания смеси пластичности применялись такие добавки как пластификатор ПФМ-НЛК и Mugaro Kombi 756.

Основные характеристики портландцемента АО «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики портландцемент АО «Себряковцемент»

Наименование вяжущего	Удельная поверхность, м ² /кг	НГ, %	Начало схватывания, час.	Конец схватывания, час.	Активность	
					при изгибе, МПа	при сжатии, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	320	25,2	2,30	3,30	7,8	49,3

Также в составы были введена базальтовая фибра длиной 12–18 мм, которая обеспечивала

необходимые физико-механические характеристики смеси (рис. 2).



Рис. 2. Базальтовая фибра

Основная часть. Экспериментальные исследования были связаны с изучением фибробетонной смеси при их выдавливании под давлением в 100 кгс.

В результате были проведено исследование следующих составов.

Состав 1.

Компонент	Расход на 1 м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Песок	1250 кг
Суперпластификатор ПФМ-НЛК	16,8 кг
Вода	170 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данный состав обладал средней пластичностью, при этом под давлением в 100 кгс происходило выделение воды, а сама смесь уплотнялась

в цилиндре, что говорит о малом количестве воды.

Состав 2.

Компонент	Расход на 1м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Гипс	16,8 кг
Песок	1250 кг
Суперпластификатор ПФМ-НЛК	16,8 кг
Вода	200 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

При добавлении гипса в объеме 3 % от массы вяжущего и увеличении объема воды в состав №1 фибробетонная смесь стала более пластичной и наблюдается сокращение сроков схватывания.

Состав под давлением 100 кгс обладал хорошей удобоукладываемостью, но при этом слабо структурировался (высокая растекаемость).

Состав 3.

Компонент	Расход на 1м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Мигарог Kombi 756	3,92 кг
Песок	1250 кг
Вода	200 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

После замены суперпластификатора ПФМ-НЛК на добавку Мигарог Kombi 756, состав стал более пластичным, но добиться нужной степени

структурируемости не удалось. Он также растекался при укладке.

Состав 4.

Компонент	Расход на 1м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Мигарог Kombi 756	9,52 кг
Песок	1250 кг
Вода	180 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Для увеличения пластичности и степени структурирования было увеличено количество добавки Мигарог Kombi 756, что привело к снижению воды. В результате пластичность смеси

оказалась недостаточной, под давлением происходило выделение воды и уплотнение в цилиндре осушенной смеси.

Состав 5.

Компонент	Расход на 1м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Мигарог Kombi 756	11,2 кг
Песок	1250 кг
Вода	210 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данная смесь показала высокие результаты удобоукладываемости, обладала высокой пластичностью. Под давлением 100 кгс хорошо

структурировалась даже при укладке в несколько слоев сразу, не растекалась.

Состав 6.

Компонент	Расход на 1м ³
Цемент	560 кг
Кварцитопесчаник	190 кг
Гипс	28 кг
Мигарог Kombi 756	11,2 кг
Песок	1250 кг
Вода	225 кг
Базальтовая фибра	16,8 кг

Данный состав был создан путем добавления в состав 5 гипса в объеме 5 % от массы цемента для ускорения сроков схватывания, что играет важную роль в 3D-печати. Это позволит укладывать друг на друга несколько слоев в короткий промежуток времени. Добавление гипса повлекло за собой увеличение водопотребности

смеси, в результате чего был увеличен объем воды. Данная смесь обладала свойствами состава 5, при этом затвердевание произошло в течение 1 часа. Были определены прочностные характеристики разработанных составов 5 и 6 (табл. 2).

Таблица 2

Прочностные характеристики составов

	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа
Состав 5	44,1	8,43
Состав 6	46,5	8,51

Выводы. Очевидно, что нужен нулевой осадок бетона. Тем не менее, бетон все еще должен быть достаточно жидким, чтобы выдавливаясь из смесителя в сопло принтера. Исследования этого очевидного противоречия были выполнены, и хорошо работающие материалы исследованы. В работе удалось разработать состав фибробетонной смеси, который можно использовать для 3D-печати. Были определены его прочностные характеристики, позволяющие сделать вывод о том, что данный состав соответствует всем требованиям, предъявляемым для такой технологии возведения зданий и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. ASTM Standard, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, vol. 10.04.
2. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO₂ Emissions, Powder Metall Rev., (2013) <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.
3. Holmstrom J., Partanen J., Tuomi H., Walter M. Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, 2010, 21, pp. 687–697.
4. Bourell D.L., Beaman J.L., Leu M.C., Rosen D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, (2009).
5. Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints, A report of Roundtable Hosted by the Royal Academy of Engineering, (2013), <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing>.
6. Hype Cycle for Emerging Technologies, (2012) <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315>.
7. Hopkinson N., Hague R., Dickens P., Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey, (2006).

8. Денисова Ю.В. Аддитивные технологии в строительстве // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №3. С. 33–42.

9. Гавшина О.В., Яшкина С.Ю., Яшкин А.Н., Дороганов В.А., Морева И.Ю. Исследование влияния дисперсных добавок на сроки схватывания и микроструктуру высокоглиноземистого цемента // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 30–37.

10. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №4. С. 38–43.

11. Елистраткин М.Ю., Минакова А.В., Джамиль А.Н., Куковицкий В.В., Эльян Исса Жамал Исса Композиционные вяжущие для отделочных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №2. С. 37–44.

12. Жариков И.С., Лакетич А., Лакетич Н. Влияние качества бетонных работ на прочность бетона монолитных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №1. С. 51–58.

13. Барабанщиков Ю.Г., Архарова А.А., Терновский М.В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7 (22). С. 152–165.

14. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.

15. Клюев С.В., Шорстова Е.С. Стеклофибробетон: секрет популярности на рынке производства // В сборнике: Наука и инновации в строительстве (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 216–223.

16. Клюев С.В., Клюев А.В., Кузик Е.С. Аддитивные технологии в строительной индустрии // В сборнике: интеллектуальные строительные

композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки

РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 54–58.

Информация об авторах

Шорстова Елена Степановна, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: kuzik_alena@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Клюев Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: klyuyev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Клюев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: klyuyev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2018 г.

© Шорстова Е.С., Клюев С.В., Клюев А.В., 2019

¹*Shorstova E.S., ^{1,*}Klyuyev S.V., ¹Klyuev A.V.*

¹*Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov.*

Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova 46

**E-mail: klyuyev@yandex.ru*

IBER CONCRETE FOR 3D-PRINTING

Abstract. *The article deals with the possibility of using 3D-printing in the construction industry. The analysis of the work performed in this area in the world. It also presents the main advantages of this method of construction of structures and buildings in general. Experimental studies were carried out using the components of the mixture: CEM I 42.5H Sebyakovcement, fine ground quartzitic sandstone with a specific surface of 700 m²/kg using gypsum. Sand was used as fine aggregate. To make the mixture plasticity, such additives as plasticizer PFM-NLK and Murapor Kombi 756 were used. Basalt fiber was used as a reinforcing agent. Were developed compositions of the concrete mixture dispersed reinforced with basalt fiber. The work was able to develop the composition of fiber-reinforced concrete mixture, which can be used for 3D-printing. Its strength characteristics were determined, allowing to conclude that this composition meets all the requirements for this technology.*

Keywords: *additive technology, construction, 3D-printing, construction technology, structures, buildings, structural optimization.*

REFERENCES

1. ASTM Standard, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, vol. 10.04.
2. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO₂ Emissions, Powder Metall Rev., (2013) <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.
3. Holmstrom J., Partanen J., Tuomi H., Walter M. Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, 2010, 21, pp. 687–697.
4. Bourell D.L., Beaman J.L., Leu M.C., Rosen D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, (2009).

5. Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints, A report of Roundtable Hosted by the Royal Academy of Engineering, (2013), <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing>.

6. Hype Cycle for Emerging Technologies, (2012) <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315>.

7. Hopkinson N., Hague R., Dickens P. Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey, (2006).

8. Denisova Yu.V. Additive technologies in construction. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 33–42.

9. Gavshina O.V., Yashkina S.Yu., Yashkin, A.N., Doroganov V.A., Moreva I.Yu. Study of the effect of dispersed additives on the setting time and

the microstructure of high-alumina cement. Construction materials and products, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 30–37.

10. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovskiy I.V. Structure formation in alkaline-activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials of different crystallinity. Construction materials and products. 2018, vol. 1, no. 4, pp. 38–43.

11. Listedin M.Yu., Minakova V.A., Jamil A.N., Kukovitskii V.V. Alan Issa Issa Zhamal Composite binders for finishing compositions. Building materials and products, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 37–44.

12. Zharikov I.S., Laketic A., Luketich N. The influence of the quality of concrete works on the strength of concrete of monolithic structures. Building materials and products, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 51–58.

13. Drummers Yu.G., Arkharova A.A., Ternovsky M.V. Concrete with reduced shrinkage and

creep. Construction of unique buildings and structures, 2014, no. 7 (22), pp. 152–165.

14. Bazhenov Y.M. Technology of concrete. M.: publishing house of DIA, 2003, 500 pp.

15. Klyuev S.V., Sherstova E.S. GRC: the secret of popularity on the market for the production of. In the book: Science and innovation in construction (the 45th anniversary of the Department of construction and urban development): a collection of papers of International scientific-practical conference. Belgorod state technological University. V. G. Shukhov, 2017, pp. 216–223.

16. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Kuzik E.S. Additive technologies in the construction industry. In the collection: intelligent building composites for green construction. International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of honored scientist of the Russian Federation, corresponding member of RAASN, doctor of technical Sciences, Professor Valery Stanislavovich Lesovik, 2016, pp. 54–58.

Information about the authors

Shorstova, Elena S. Postgraduate student. E-mail: kuzik_alena@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Klyuev, Sergey V. PhD, Assistant professor. E-mail: klyuev@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Klyuev, Aleksandr V. PhD, Assistant professor. E-mail: klyuev@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in Desember 2018

Для цитирования:

Шорстова Е.С., Ключев С.В., Ключев А.В. Фибробетон для 3D-печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 22–27. DOI: 10.34031/article_5ca1f6300a4956.62644399

For citation:

Shorstova E.S., Klyuev S.V., Klyuev A.V. Fiber concrete for 3D-printing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 22–27. DOI: 10.34031/article_5ca1f6300a4956.62644399