DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-14-20

*Клюев С.В. *, кандидат технических наук, доцент,
Клюев А.В., кандидат технических наук, доцент,
Шорстова Е.С., аспирант,*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

**Ответственный автор E-mail: Klyuyev@yandex.ru*

ФИБРОБЕТОН ДЛЯ 3-D АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация: мелкозернистый фибробетон используемый в 3D-печати существенно отличается от обычных тяжелых бетонов, что обуславливается увеличенным расходом цемента, низким водоцементным отношением и отсутствием крупного заполнителя. Наибольшую крупность зерен мелкого заполнителя выбирают с учетом толщины сечения, частоты и вида армирования, а также способа укладки бетона. Несмотря на то, что, прочность бетона на растяжение на мелком песке более чем в 1,5 раза выше прочности бетона на крупном песке, при этом отмечается уменьшение прочности на сжатие. В связи с особенностями технологии изготовления бетона для послойной укладки использование крупных песков нецелесообразно, в связи, с чем было принято решение применять в качестве заполнителя кварцевый песок с модулем крупности 1,12.

Ключевые слова: микрокремнезем, добавка, 3-D технологии, мелкозернистый фибробетон

Введение

Для применения аддитивных технологий в строительстве требуются разработки и изучение новых материалов, используемых в 3D-печати. Однако многие разработчики сталкиваются с проблемой подбора материалов. Фундаментальные соотношения концепции индустрии (конструкция – материал – технология) еще не интегрированы в строительную сферу [1-9].

Цементные составы, которые твердеют длительное время не удовлетворяют требованиям производительности 3D-печати. Состав должен быть тиксотропным, то есть уменьшать вязкость от механического воздействия и увеличивать вязкость в состоянии покоя. Возможное решение для строительной печати – сернистый бетон, который представляет собой композитный материал, изготовленный из серы и заполнителя. Смесь нагревают выше температуры плавления серы. После охлаждения бетон достигает заданной прочности без длительного твердения [10-17].

Методы и материалы

При проектировании состава мелкозернистого фибробетона для 3D-печати необходимо учитывать консистенцию бетонной смеси, для получения требуемой удобоукладываемости. Исходя из того что основным способом производства бетона для 3D аддитивных технологий является метод послойной укладки, оптимизация водо-вяжущего отношения и достижение необходимых консистенций достигалось за счет ввода суперпластификатора ПФМ-НЛК и добавки Murapog Kombi 756. В качестве вяжущего применялся товарный портландцемент АО «Себряковцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н и тонкомолотый кварцитопесчанник с удельной поверхностью 11000 г/см², представляющий собой минеральный наполнитель техногенного происхождения, который использовался для улучшения реологических свойств и увеличения плотности структуры бетона, а также гипс. Базальтовая фибра длиной 12-18 мм обеспечивала необходимые физико-механические характеристики смеси.

Результаты и обсуждения

Для увеличения пластичности и степени структурирования смеси было увеличено количество добавки Murapog Kombi 756. Так же был снижен объем воды, так как данная добавка снижает водопотребность. В результате пластичность смеси оказалась недостаточной, под давлением происходило выделение воды и уплотнение в цилиндре осушенной смеси.

Состав 1

	Компонент	Расход на 1м ³
1.	Цемент	560 кг
2.	Кварцитопесчанник	190 кг
3.	Murapog Kombi 756	11,2 кг
4.	Песок	1250 кг
5.	Вода	210 кг
6.	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 2

	Компонент	Расход на 1 м ³
1.	Цемент	560 кг
2.	Кварцитоесчаник	190 кг
3.	Гипс	28 кг
4.	Murapor Kombi 756	11,2 кг
5.	Песок	1250 кг
6.	Вода	225 кг
7.	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 3-D 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.

В результате экспериментальных исследований различных составов, и внесения поправок, с учетом изменения технологических свойств смесей, были получены оптимизированные составы мелкозернистого бетона для 3D-печати по двум основным вариантам.

Результаты физико-механических испытаний образцов оптимальных составов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения прочностных характеристик
разработанных составов мелкозернистого бетона**

Table 1

Strength properties determination results of fine-grained concrete developed formulations

Номер состава	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Средняя плотность в момент испытания, кг/м ³	Класс по прочности на сжатие	Класс по прочности на растяжение при изгибе
Состав 5	44,8	8,43	2180	B35	B _{tb} 6,0
Состав 6	46,5	8,51	2200	B35	B _{tb} 6,0

Основными свойствами, определяющими долговечность бетона в первую очередь являются морозостойкость, его коррозионная стойкость, а также коррозионная стойкость арматуры в бетоне, которые обеспечиваются прочностью и плотностью структуры (табл. 2-5).

Таблица 2

**Результаты определения прочности при сжатии и массы
контрольных и основных образцов (Состав 5)**

Table 2

**Determination results of the compressive strength and mass
control and main samples (Composition 5)**

Маркировка образца	Прочность при сжатии, МПа		Масса, г		Уменьшение массы образцов, % (не более 2)
	контрольные	основные	До начала испытаний в насыщенном состоянии	После 8 циклов замораживания-оттаивания	
1	44,2	-	-	-	-
1	43,2	-	-	-	-
2	46,6	-	-	-	-
2	45,1	-	-	-	-
3	45,6	-	-	-	-
3	44,3	-	-	-	-
1	-	42,5	2200	2200	0
1	-	43,1	2190	2190	0
2	-	42,9	2200	2200	0
2	-	44,1	2200	2200	0
3	-	42,4	2190	2190	0
3	-	43,7	2190	2190	0

Таблица 3

Результаты расчета морозостойкости

Table 3

Frost resistance calculation results

Показатель	Значения показателей	
	контрольных образцов	основных образцов
$\overline{X}_{\text{ф}}^I$, МПа	48,8	-
σ_n^I , МПа	1,36	-
$\overline{X}_{\text{ф}}^{II}$, МПа	-	43,1
σ_n^{II} , МПа	-	0,68
V, %	3,0	1,5
$\overline{X}_{\text{min}}^I$, МПа	42,2	-
$0,9\overline{X}_{\text{min}}^I$, МПа	38,0	-
$\overline{X}_{\text{min}}^{II}$, МПа	-	41,3

Нижняя граница доверительного интервала прочности контрольных образцов с учетом коэффициента 0,9 равна 38,8 МПа, нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов равна 41,3 МПа. Таким образом, образцы выдержали 8 циклов испытаний по третьему методу, что соответствует марке бетона по морозостойкости F₁₃₀₀.

Таблица 4

Результаты определения прочности при сжатии и массы контрольных и основных образцов (Состав 6)

Table 4

Determination results of the compressive strength and mass control and main samples (Composition 6)

Номер образца	Прочность при сжатии, МПа		Масса, г		Уменьшение массы образцов, % (не более 2)
	контрольные	основные	До начала испытаний в насыщенном состоянии	После циклов 8 замораживания- оттаивания	
1	47,5	-	-	-	-
2	46,2	-	-	-	-
3	46,1	-	-	-	-
4	46,5	-	-	-	-
5	47,7	-	-	-	-
6	46,0	-	-	-	-
7	-	46,1	2220	2220	0
8	-	45,8	2210	2210	0
9	-	45,1	2210	2210	0
10	-	46,4	2210	2210	0
11	-	45,2	2220	2220	0
12	-	45,6	2220	2220	0

Таблица 5

Результаты расчета морозостойкости

Table 5

Frost resistance calculation results

Показатель	Значения показателей	
	контрольных образцов	основных образцов
$X_{ф}^I$, МПа	46,6	-
σ_n^I , МПа	0,68	-
$X_{ф}^{II}$, МПа	-	45,7
σ_n^{II} , МПа	-	0,52
V, %	1,4	1,1
$X_{мн}^I$, МПа	44,8	-
$0,9X_{мн}^I$, МПа	40,3	-
$X_{мн}^{II}$, МПа	-	44,3

Нижняя граница доверительного интервала прочности контрольных образцов с учетом коэффициента 0,9 равна 40,3 МПа, нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов равна 44,3 МПа. Таким образом, образцы выдержали 8 циклов испытаний по третьему методу, что соответствует марке бетона по морозостойкости F₃₀₀.

Исследование кинетики процессов гидратации и твердения цемента, генезиса микроструктуры цементного камня с органоминеральными добавками имеет большое значение, поскольку открывает путь к научному прогнозированию его свойств. В связи с этим с помощью методов физико-химического анализа изучены особенности гидратации цементного камня с добавками микрокремнезема.

Рис. 1. Микроструктура контактной зоны «цементный камень – фибра»

Fig. 1. Microstructure of the contact zone "cement stone - fiber"

Выводы

Высокая степень дисперсности и соответствующий химический состав микрокремнезема делают его одним из наиболее эффективных и удобных видов минеральных добавок к портландцементу. Микрокремнезем дисперснее, чем размолотый портландцементный клинкер и играет роль наполнителя, заполняя мельчайшие пустоты цементно-песчаной матрицы. Благодаря заполнению пустот повышается степень упаковки твердого вещества и соответственно прочность. Микрокремнезем представлен стекловидными сферическими частицами диаметром около 100 мкм, проявляют пуццоланическими свойствами за счет реакционных Al_2O_3 и SiO_2 .

Микроструктура на алитовых участках зерен портландцемента представлена мелкодисперсными гидросиликатами кальция и параллельными слоями портландита. На белитовых участках зерен цемента вследствие ритмичности процесса гидратации наблюдаются слои гидратных новообразований с игольчатой-чешуйчатой поверхностью. Микроструктура с мелкодисперсными гидросиликатами в цементном камне положительно влияет на его прочность; наличие крупнокристаллических блоков портландит, гидроалюмо-

феритив, гидросульфалоумоферитив кальция в микроструктуре негативно влияет на прочность камня. Для повышения прочности цементного камня необходимо уменьшить количество и размеры в его микроструктуре крупнокристаллических блоков портландит, гидроалоумоферитив, гидросульфалоумоферитив кальция и одновременно увеличить количество мелкодисперсной составляющей, что достигается снижением водоцементного отношения и компактным размещением выходных цементирующих зерен в системе "цемент-вода" за счет использования модификаторов.

Для исследуемого образца характерна довольно плотная микроструктура с большим количеством пор, которые либо уже заросли гидратными новообразованиями, либо находятся в стадии застывания. Важно наличие параллельно ориентированных призматических, пластинчатых и волокнистых кристаллов, имеющих совершенную спайность по направлению их роста. Размер кристаллов, составляющих блоки, может достигать 10 мкм, раскалывание их происходит по-разному: вдоль пластин спайности и поперек.

Исследование влияния изменения фазового состава и микроструктуры цементного камня на основе модифицированных цементных систем позволило установить, что введение тонкодисперсных добавок обеспечивает оптимальное формирование структуры цементного камня. Разрушение цементного камня под действием внешних механических сил начинается с образования закрытых микроскопических трещин в кристалоагрегатах и на границе контакта роста кристаллов в блоки, послойно и в блоках цементного геля. Для повышения прочности цементного камня целесообразно уменьшить количество и размеры крупнокристаллических блоков портландита, что достигается снижением водоцементного отношения и компактным размещением выходных зерен в цементирующей системе с модификаторами гиперпластифицирующего действия.

Литература

1. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 сентября 2015 г. N 1013 "О создании технического комитета по стандартизации "Аддитивные технологии" [Электронный ресурс]. Информационно-правовой портал Гарант.ру. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71074904/> (дата обращения: 27.09.2016).
2. Gálvez J.A. Not Just a Pretty Face: Three-Dimensional Printed Custom Airway Management Devices. 3D Printing and Additive Manufacturing. 2016. Т. 3. N3. С. 160 – 165.
3. Kreiger M.A., MacAllister B.A., Wilhoit J.M., Case M.P. The current state of 3D printing for use in construction // The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure: Ames. Iowa. 2015. С. 149 – 158.
4. Herderick E.D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future // JOM. 2016. Т. 68. N3. С. 721 – 723.
5. L. Xi-Qiang L. Jing-Fang Z. Tao H. Liang Z. Nan L. Juan L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: пат. CN104310918A. 2014.
6. Tianrong Y., Qiaoling L. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: пат. CN104891891A. 2015.
7. Campbell T., Williams C., Ivanova O. Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC. 2011.
8. Малышева В.Л., Красиминова С.С. Возможности 3D принтера в строительстве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. №12-2.
9. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2015. №8 (12).
10. Ключев С.В. Основы конструктивной организации природных и искусственных материалов // Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: сб. студ. докл. Международного конгресса: в 2 ч. Ч. 1. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. С. 161 – 163.
11. Ключев С.В. Высокопрочный сталефибробетон на техногенных песках КМА // Технологии бетонов. 2012. №5-6 (70-71). С. 33 – 35.
12. Ключев С.В., Авилова Е.Н. Бетон для строительства оснований автомобильных дорог на основе сланцевого щебня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С. 38 – 41.
13. Ключев С.В. Высокопрочный сталефибробетон на техногенных песках КМА // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. №11 (178). С. 38 – 39.
14. Ключев С.В. Особенности формирования фибробетонных композитов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №5. С. 32 – 35.
15. Ключев С.В. Применение композиционных вяжущих для производства фибробетонов // Технологии бетонов. 2012. №1-2 (66-67). С. 56 – 58.

16. Ключев С.В. Высокопрочный мелкозернистый фибробетон на техногенном сырье и композиционных вяжущих // Бетон и железобетон. 2014. №4. С. 14 – 16.

17. Ключев С.В., Ключев 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.

References

1. Prikaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 1 sentyabrya 2015 g. N 1013 "O sozdaniy tekhnicheskogo komiteta po standartizatsii "Additivnye tekhnologii" [Elektronnyj resurs]. Informacionno-pravovoj portal Garant.ru. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71074904/> (data obrashcheniya: 27.09.2016). (rus.)

2. Gálvez J.A. Not Just a Pretty Face: Three-Dimensional Printed Custom Airway Management Devices. 3D Printing and Additive Manufacturing. 2016. 3 (3). P. 160 – 165.

3. Kreiger M.A., MacAllister B.A., Wilhoit J.M., Case M.P. The current state of 3D printing for use in construction. The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure: Ames. Iowa. 2015. P. 149 – 158.

4. Herderick E.D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future. JOM. 2016. 68 (3). P. 721 – 723.

5. L. Xi-Qiang L. Jing-Fang Z. Tao H. Liang Z. Nan L. Juan L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: pat. CN104310918A. 2014.

6. Tianrong Y., Qiaoling L. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: pat. CN104891891A. 2015.

7. Campbell T., Williams C., Ivanova O. Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC. 2011.

8. Malysheva V.L., Krasimirova S.S. Vozmozhnosti 3D printera v stroitel'stve. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2013. 12 (2). (rus.)

9. Mustafin N.SH., Baryshnikov A.A. Novejshie tekhnologii v stroitel'stve. 3D printer. Regional'noe razvitie: elektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal. 2015. 8 (12). (rus.)

10. Klyuev S.V. Osnovy konstruktivnoj organizatsii prirodnykh i iskusstvennykh materialov. Sovremennye tekhnologii v promyshlennosti stroitel'nykh materialov i strojindustrii: sb. stud. dokl. Mezhdunarodnogo kongressa: v 2 ch. CH. 1. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V.G. SHuhova, 2003. P. 161 – 163. (rus.)

11. Klyuev S.V. Vysokoprochnyj stalefibrobeton na tekhnogennykh peskah KMA. Tekhnologii betonov. 2012. 5-6 (70-71). P. 33 – 35. (rus.)

12. Klyuev S.V., Avilova E.N. Beton dlya stroitel'stva osnovanij avtomobil'nykh dorog na osnove slancevogo shchebnya. Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova. 2013. 2. P. 38 – 41. (rus.)

13. Klyuev S.V. Vysokoprochnyj stalefibrobeton na tekhnogennykh peskah KMA. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii HKHI veka. 2013. 11 (178). P. 38 – 39. (rus.)

14. Klyuev S.V. Osobennosti formirovaniya fibrobetonnykh kompozitov. Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova. 2015. 5. P. 32 – 35. (rus.)

15. Klyuev S.V. Primenenie kompozitsionnykh vyazhushchih dlya proizvodstva fibrobetonov. Tekhnologii betonov. 2012. 1-2 (66-67). P. 56 – 58. (rus.)

16. Klyuev S.V. Vysokoprochnyj melkozernistyj fibrobeton na tekhnogennom syr'e i kompozitsionnykh vyazhushchih. Beton i zhelezobeton. 2014. 4. P. 14 – 16. (rus.)

17. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Kuzik E.S. Additivnye tekhnologii v stroitel'noj industrii. V sbornike: intelektual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva: Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya 70-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, chlena-korrespondenta RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk, professora Valeriya Stanislavovicha Lesovika. 2016. P. 54 – 58. (rus.)

**Klyuev S.V. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Klyuev A.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Shorstova E.S., Postgraduate,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia**
*Corresponding author E-mail: Klyuyev@yandex.ru

FIBER CONCRETE FOR 3-D ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract: fine-grained fiber concrete used in 3D printing is significantly different from conventional heavy concrete, which is determined by the increased consumption of cement, low water-cement ratio and the absence of large aggregates. The largest grain size of fine aggregate is selected taking into account the thickness of the section, the frequency and type of reinforcement, as well as the method of concrete placement. Despite the fact that the tensile strength of concrete on fine sand is more than 1.5 times higher than the strength of concrete on coarse sand, while there is a decrease in compressive strength. Due to the peculiarities of the technology of concrete manufacturing for layering, the use of coarse sands is impractical, and therefore it was decided to use quartz sand with a particle size module of 1.12 as a filler.

Keywords: microsilica, additive, 3-D technology, fine-grained fiber concrete

Для цитирования: Ключев С.В., Ключев А.В., Шорстова Е.С. Фибробетон для 3-d аддитивных технологий // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №4. С. 14 – 20. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-14-20

For citation: Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Fiber concrete for 3-d additive technologies. Construction Materials and Products. 2019. 2 (4). P. 14 – 20. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-14-20

Поступила в редакцию 8 мая 2019 г.

Принята в доработанном виде 12 июня 2019 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2019 г.

Received: May 8, 2019.

Revised: June 12, 2019.

Accepted: July 20, 2019.