DOI: 10.12737/article_5a001aad6cece5.38594033

Ищенко А.В., асп., инж.-исс.,
Огурцова Ю.Н., канд. техн. наук, доц.,
Строкова В.В., д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОСОБЕННОСТИ ФИБРЫ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА КАК ЭЛЕМЕНТА САМООЧИЩАЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

ogurtsova.y@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования характеристик цементного камня в зависимости от вида фибры как элемента самоочищающейся поверхности. Приведены исследования краевого угла смачивания горизонтальной поверхности, поверхности под углом 70°, прочности на сжатие цементного камня с различным содержанием фибры и гидрофобизирующей добавки. Для исследования использовались 4 вида фибры различного состава: базальтовая фибра, стекловолокно, фибра полипропиленовая (ВСМ), фибра из поливинилового спирта. На основе полученных результатов становится возможным выбор вида и дозировки фибры в зависимости от назначения материала, а также эффективности ее совместного использования с объемной гидрофобизацией. При проектировании самоочищающихся фасадных материалов при необходимости достижения высоких значений краевого угла смачивания рекомендуется использование стекловолокна (3 %) или ПВС-фибры (3 %) с гидрофобизирующей добавкой (1 %). При необходимости достижения высоких прочностных характеристик рекомендуется использование ВСМ (3 %) без гидрофобизирующей добавки. Оптимальным (средние показатели краевого угла смачивания и прочности на сжатие) является использование базальтовой фибры (3 %) без гидрофобизирующей добавки.

Ключевые слова: *фибра, гидрофобизирующая добавка, цементный камень, краевой угол смачивания, прочность.*

Введение. Высокая смачиваемость капиллярно-пористой поверхности традиционных фасадных материалов на основе цемента обуславливает их периодическое увлажнение при эксплуатации и циркуляцию жидкой фазы в толще композита. Фасадные материалы постоянно подвергаются воздействию агрессивных сред, которые вызывают высолообразование, сульфатную коррозию, а также вымывание минеральных компонентов. Эксплуатация материала во влажной среде может привести к образованию микроорганизмов, грибков, лишайников, бактерий на его поверхности и в объеме. Следствием этого могут стать повышенная влажность фасада, снижение его прочности и даже разрушение, проявляющееся в виде локальной коррозии либо отделения поверхностного слоя, которое влияет на эстетический вид сооружения, а также, при биокоррозии, неприятный запах, аллергические реакции у жителей.

Одним из способов защиты поверхности фасада является придание ему самоочищающихся свойств путем создания высокоразвитой поверхности материала за счет получения иерархической структуры с применением гидрофобизирующей эмульсии [1–4]. Данный метод призван обеспечить комплексную защиту материала от атмосферного воздействия, увеличить срок службы изделия, повысить эстетические качества и внешний облик здания в целом, оставаясь физиологически безопасным для человека и экологически безвредным для природы.

Традиционно способность материала к самоочищению достигается созданием системы нано- или микрошероховатости на его поверхности [5–8]. Достижение известного «эффекта лотоса» на строительных материалах затруднено. Так, например, поверхность традиционного цементного бетона является грубодисперсной, в том числе характеризуется присутствием пор и капилляров, что нивелирует эффект, создаваемый нано- или микрочастицами [9–12]. Проблематично также равномерное распределение и закрепление этих частиц, обеспечение долговечности самоочищающегося слоя. Негативными факторами также являются быстрая потеря эффективности в условиях повышенных температур и механических нагрузок, высокая себестоимость. В связи с чем, актуальным направлением является оптимизация механизма создания развитой гидрофобной поверхности цементного материала с учетом обеспечения высокой способности к самоочищению. Важным компонентом иерархической структуры поверхности является фибра, от характеристик которой будут зависеть как поверхностные, так и объемные свойства создаваемого композита [13–15]. В данной работе представлены результаты исследования характери-

стик цементного камня и его поверхности в зависимости от вида фибры как элемента самоочищающейся поверхности.

Методология. Для исследования использовались 4 вида фибры различного состава: базальтовая фибра ООО «Каменный век», Россия, Московская обл., г. Дубна; стекловолокно ООО «Стеклотекс», Россия, Самарская обл., г. Сызрань; волокно строительное микроармирующее (ВСМ) (фибра полипропиленовая) ООО «Си Айрлайд», Россия, Челябинская обл., г. Челябинск; фибра из поливинилового спирта (ПВС-фибра) ООО «Курарай», Япония, г. Осака.

Микроструктурные исследования фибры проводили на сканирующем электронном микроскопе Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия) в режиме высокого вакуума (InBeam) с использованием катода Шоттки высокой яркости.

Затем были приготовлены образцы цементного камня на основе портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент». Исследуемые виды фибр вводились в содержании 1, 3 и 5 %. В/Ц смесей составляло 0,28. Влияние фибры различного состава на прочность цементного камня исследовалось в возрасте 28 суток твердения. Помимо этого, проводилось исследование величины краевого угла смачивания поверхности образцов в горизонтальном положении, а также под наклоном 70°. Исследования проводились с использованием прибора для измерения краевого угла смачивания KRUSS DSA 30 (KRUSS GmbH, Германия). Наклон образцов под углом 70° был использован с целью приближения эксперимента к реальным условиям эксплуатации материала и обусловлен максимально возможным углом поворота предметного столика прибора.

На следующем этапе были приготовлены образцы цементного камня с фиброй различных видов (3 %) и гидрофобизатором «Мурасан БВА 17» производства ООО «Эм-Си Баухеми». Расход гидрофобизатора варьировался: 0,5; 1 и 1,5 %. После 28 суток нормального твердения для полученных образцов аналогично исследовались: прочность на сжатие, краевой угол смачивания в горизонтальном положении и под наклоном 70°.

Основная часть. В связи с тем, что в предлагаемых исследованиях фибра будет выступать элементом высокоразвитой поверхности композита, параметрами, представляющими интерес, являются – длина и диаметр волокна (табл. 1), шероховатость (рис. 1). Все виды фибр, выбранные для исследования, являются совместимыми с цементной средой и используются для получения бетонов.

Таблица 1

Параметры фибры различного состава

Параметры фибры	Тип фибры			
	Базальтовая фибра	Стекловолокно	Фибра полипропиленовая (ВСМ)	Волокна поливинилового спирта (ПВС-фибра)
Длина волокна, мм	12,7	12	12	8
Диаметр филамента, мкм	10–22	13–15	20–22	38

Наименьшим диаметром обладают волокна базальтовой и стеклянной фибры, наибольшим – волокна ПВС-фибры. Поверхность базальтовой и стеклянной фибр является преимущественно гладкой с незначительным присутствием замасливателя, цель использования которого заключается в улучшении разделения филаментов и распределения фибры в объеме бетонной смеси (рис. 1, а, б). Поверхность органических волокон (ВСМ (рис. 1, в) и ПВС (рис. 1, г) отличаются большей шероховатостью ввиду их состава и технологии производства.

На следующем этапе исследуемые волокна вводились в состав цементного камня в различных дозировках (1, 3 и 5 %). Целью исследований являлось установление влияния фибры различного состава на краевой угол смачивания в горизонтальном положении и под наклоном 70°, как наиболее важные параметры самоочищающихся поверхностей, а также на предел прочности при сжатии цементного камня. Также целью эксперимента для всех видов фибр являлось установление той дозировки, при которой возможно достижение максимального краевого угла смачивания. Для базальтовой фибры и ВМС это содержание составляет – 3 %, для стекловолокна и ПВС-фибры – 5 %. Значения краевого угла смачивания, достигаемые при данных дозировках фибры, представлены на рисунке 2. Стоит отметить, что при значительном повышении краевого угла смачивания за счет введения фибры, прочность на сжатие образцов с базальтовой фиброй, стекловолокном и ПВС-фиброй понижается на 11,6; 40,4 и 6,8 % соответственно. Снижение прочности на сжатие обусловлено разуплотнением структуры из-за избыточного содержания фибры. Использование же ВСМ позволяет повысить прочность на сжатие на 50,9 %. В качестве контрольного образца использовался цементный камень (В/Ц=0,28).

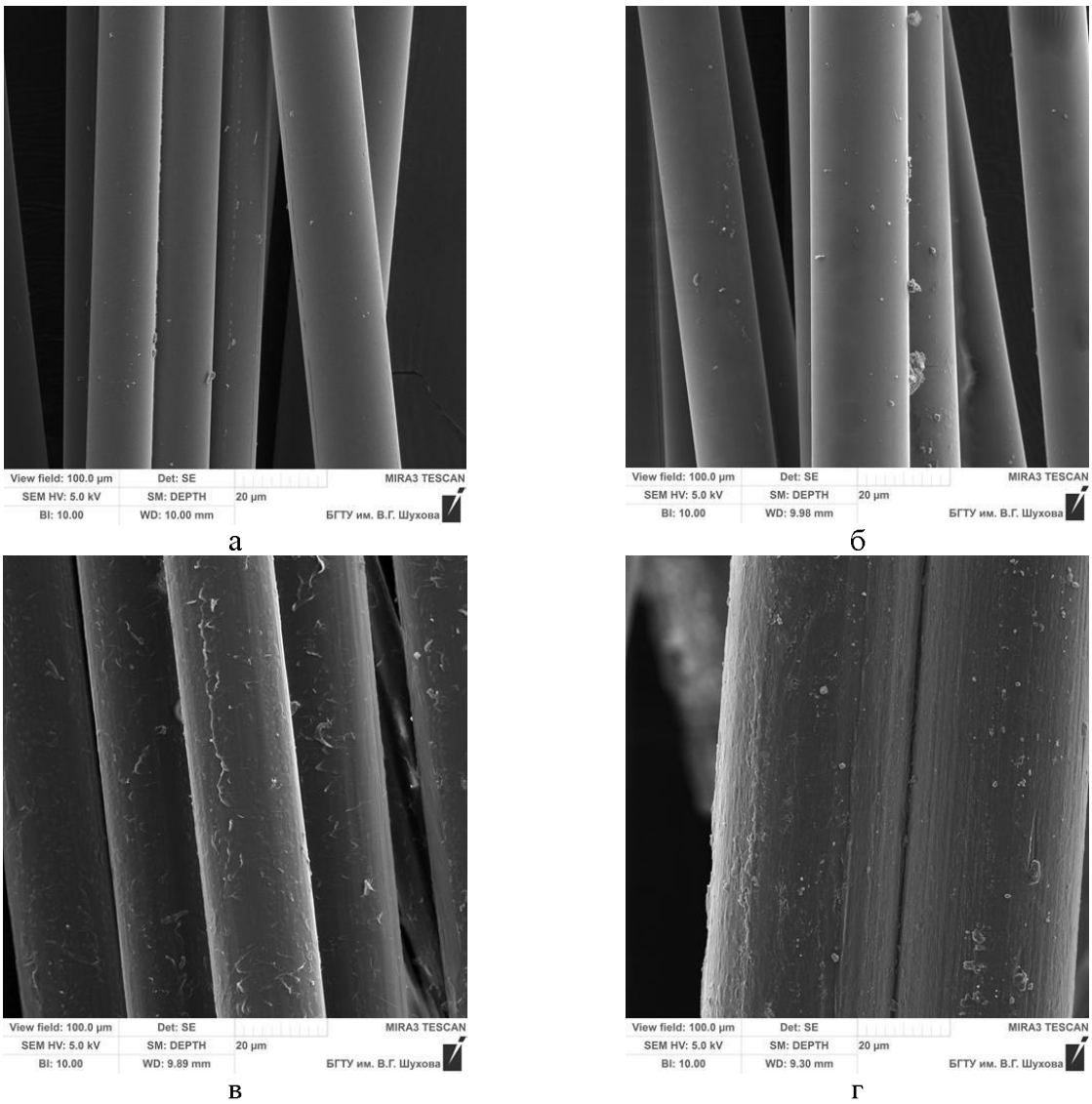

Рис. 1. Микроструктурные особенности фибры:
а – базальтовой; б – стекловолокна; в – ВСМ; г – ПВС

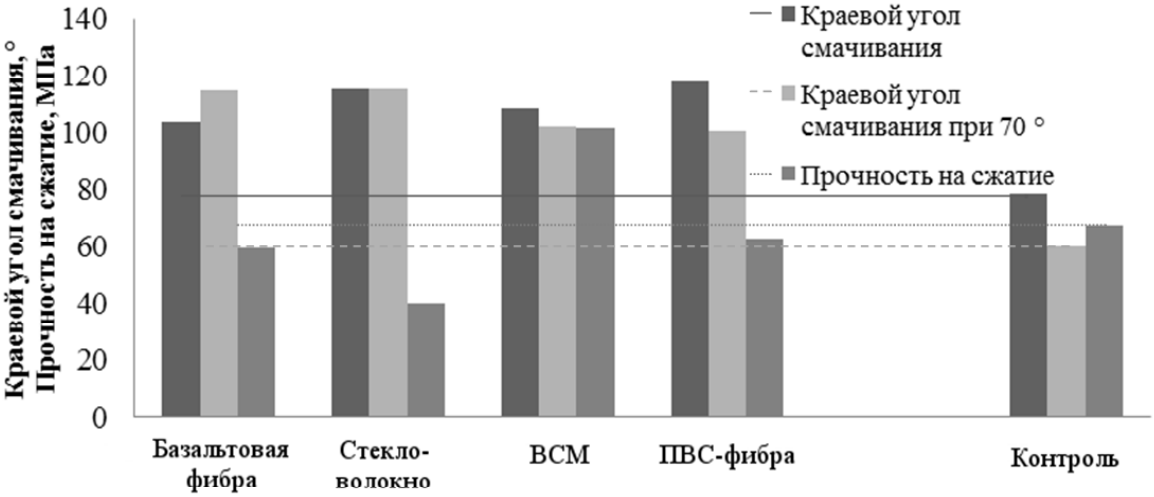

Рис. 2. Максимальные значения краевого угла смачивания поверхности образцов цементного камня в зависимости от вида фибры

С целью сравнения эффективности фибры в таблице 2 представлены результаты при введении 3 % фибры каждого вида. Стоит отметить, что все используемые виды фибры позволяют повысить краевой угол смачивания поверхности в

месте выхода волокна, что обусловлено снижением площади контакта водяной капли с поверхностью цементного камня. Величина данного эффекта зависит как от смачиваемости материала фибры, так и равномерности ее распределения при приготовлении смеси.

Таблица 2

Характеристики образцов цементного камня с фиброй (3 %), МПа

Характеристика образца	Тип фибры				Контроль
	Базальтовая	Стекловолокно	ВСМ	ПВС	
Краевой угол смачивания, °	103,6	106,6	108,7	92,8	78,4
Краевой угол смачивания при наклоне 70°, °	115,1	105,4	102,2	91,5	60,3
Прочность на сжатие, МПа	59,6	48,5	101,7	70,6	67,4

По полученным данным исследованная фибра может быть ранжирована:

- по уменьшению значения краевого угла смачивания:

ВСМ → Стекловолокно → Базальтовая фибра → ПВС-фибра.

- по уменьшению значения краевого угла смачивания под наклоном 70°:

Базальтовая фибра → Стекловолокно → ВСМ → ПВС-фибра.

- по влиянию на прочность:

ВСМ (↑) → ПВС-фибра (↑) → Базальтовая фибра (↓) → Стекловолокно (↓).

Для изучения возможности повышения значений краевого угла смачивания в объем образцов вводилась гидрофобизирующая добавка. В связи с тем, что максимальные значения прочности на сжатие наблюдались для большинства видов фибр при дозировке 3 %, то для следующего эксперимента все виды фибр вводились в данной дозировке. Но при этом варьировался расход гидрофобизатора: 0,5; 1 и 1,5 %. В таблице 3 приведены значения для 1 % гидрофобизатора. В строках с обозначением Δ, % (табл. 3) рассчитана разница значений краевого угла смачивания в горизонтальном положении и при наклоне 70°, а также прочности на сжатие образцов с фиброй при дополнительном введении гидрофобизирующей добавки в сравнении с образцами без добавки (см. табл. 2).

Таблица 3

Характеристики образцов цементного камня с фиброй и гидрофобизатором, МПа

Характеристика образца	Тип фибры				Контроль
	Базальтовая	Стекловолокно	ВСМ	ПВС	
Краевой угол смачивания ($К_{ус}$), °	130,4	136,1	77,3	138,2	78,4
Δ $К_{ус}$, %	+25,9	+27,7	-28,9	+48,9	-
Краевой угол смачивания при наклоне 70° ($К_{ус}$), °	109,2	126,1	73,5	115,0	60,3
Δ $К_{ус}$, %	-5,1	+19,6	-28,1	+25,7	-
Прочность на сжатие ($R_{сж}$), МПа	52,9	44,1	29,7	47,7	67,4
Δ $R_{сж}$, %	-11,2	-9,1	-70,8	-32,4	-

Полученные результаты позволяют отметить различный характер взаимодействия компонентов. Так при использовании стекловолокна (табл. 3, рис. 3) введение гидрофобизатора в объем материала позволяет повысить краевой угол смачивания, при этом уменьшение прочности – незначительно. Значительный положительный эффект увеличения краевого угла смачивания наблюдается при совместном использовании ПВС-фибры с гидрофобизирующей добавкой, но при этом прочность на сжатие уменьшается. Стоит отметить, что не рекомендуется совместное использование исследованного гидрофобизатора с ВСМ, так все исследованные характеристики значительно снижаются (табл. 3), что может быть обусловлено повышенным воздухововлечением и разуплотнением структуры материала.

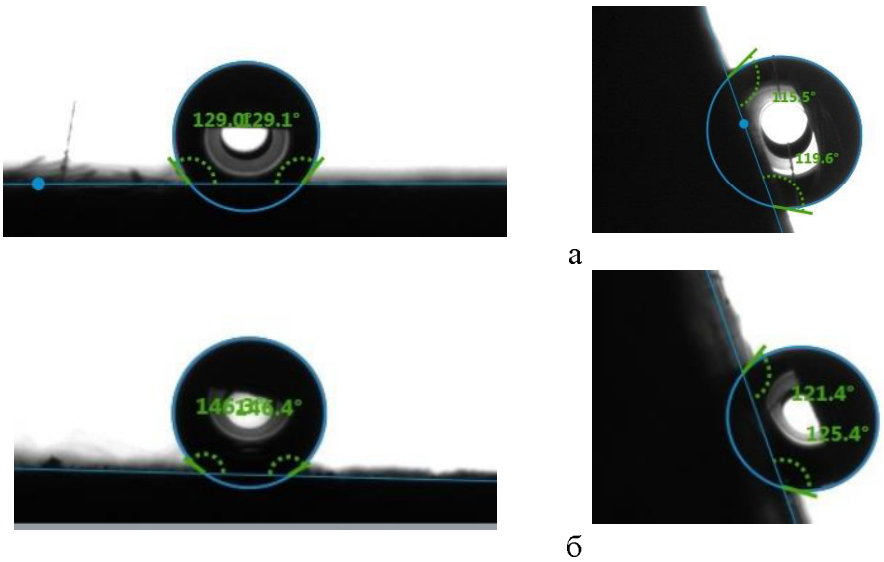

Рис. 3. Определение краевого угла смачивания поверхности цементного камня со стекловолокном в горизонтальном положении и под углом 70°: а – без гидрофобизатора, б – с гидрофобизатором

Заключение. Связь полученных результатов по определению краевого угла смачивания с параметрами фибры не подтверждает положительного влияния шероховатости ее поверхности (ВСМ и ПВС-фибра) на значение краевого угла смачивания.

На основе полученных результатов становится возможным осуществление выбора вида, дозировки фибры в зависимости от назначения материала, а также совместного ее использования с объемной гидрофобизацией. В частности, при проектировании самоочищающихся фасадных материалов при необходимости достижения высоких значений краевого угла смачивания рекомендуется использование стекловолокна (3 %) или ПВС-фибры (3 %) с гидрофобизирующей добавкой (1 %). При необходимости достижения высоких прочностных характеристик рекомендуется использование ВСМ (3 %) без гидрофобизирующей добавки. Оптимальным (средние показатели краевого угла смачивания и прочности на сжатие) является использование базальтовой фибры (3 %) без гидрофобизирующей добавки.

Предполагается, что механическая обработка поверхности образцов, а также поверхностная обработка фибры гидрофобной эмульсией с целью создания иерархической структуры позволят улучшить водооталкивающие характеристики поверхности, что станет предметом дальнейших исследований.

**Работа выполнена в рамках реализации гранта программы УМНИК №8417ГУ/2015 и Стипендии Президента СП-908.2015.1.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожухова М.И., Кнотько А.В., Соболев К.Г., Кожухова Н.И. Микроструктурные особенности формирования иерархической структуры на гидрофобизированной поверхности бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 6–9.

2. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. № 77 (7). С. 619–638.

3. Muzenski S.W., Flores-Vivian I., Kozhukhova M.I., Rao S., Nosonovsky M., Sobolev K. Nano-engineered Superhydrophobic and Overhydrophobic Concrete. In: Sobolev K., Shah S. (eds) Nanotechnology in Construction. Springer, Cham. 2015. P. 443–449.

4. Кожухова М.И., Строкова В.В., Соболев К.С. Особенности гидрофобизации мелкозернистых бетонных поверхностей // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2014. № 4. С. 33.

5. Кочетков А.В., Чванов А.В. Новые антигололедные дорожные покрытия с шероховатой поверхностью в России // Строительные материалы. 2009. № 11. С. 76–78.

6. Bhushan B., Jung Y.C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction // Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56. P. 1–108.

7. Miwa M., Nakajima A., Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T. Effects of the surface roughness on sliding angles of water droplets on superhydrophobic surfaces // Langmuir. 2000. Vol. 16. P. 5754–5760.

8. Feng X.Q., Gao X., Wu Z., Jiang L., Zheng Q.S. Superior water repellency of water strider legs with hierarchical structures: Experiments and analysis // Langmuir. 2007. Vol. 23. P. 4892–4896.

9. Колесов Е. О применении нанотехнологий в производстве строительных материалов в Китае // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2009. № 2. С. 65–70.

10. Лесовик В.С., Урханова Л.А., Федюк Р.С. Вопросы повышения непроницаемости фибробетонов на композиционном вяжущем // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 1. С. 5–10.

11. Матвеева Е.Г., Королева Е.Л. Фибробетон с добавкой нанодисперсного кремнезема // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С.140–146.

12. Кожухова М.И., Чулкова И.Л., Хархардин А.Н., Соболев К.Г. оценка эффективности применения гидрофобных водных эмульсий с содержанием нано- и микроразмерных частиц для модификации мелкозернистого бетона // Строительные материалы. 2017. № 5. С. 92–97.

13. Бабаев В.Б., Нелюбова В.В., Жерновский И.В. Термическая обработка базальтового волокна как способ повышения его щелочестойкости // Строительные материалы. 2013. № 10. С. 58–61.

14. Хархардин А.Н., Сивальнева М.Н., Строкова В.В. Топологический расчет основных параметров фибры для получения пенобетона на основе бесцементного наноструктурированного вяжущего // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2016. Т. 8. № 4. С. 73–88.

15. Клюев С.В., Лесовик Р.В. Дисперсно армированный стекловолокном мелкозернистый бетон // Бетон и железобетон. 2011. № 6. С. 4–6.

Информация об авторах

Ищенко Алина Валентиновна, аспирант кафедры Материаловедения и технологии материалов, инженер-исследователь НИИ Наносистемы в строительном материаловедении Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра Наноструктурированных композиционных материалов
E-mail: alina.ishchenko.92@mail.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Огурцова Юлия Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ Наносистемы в строительном материаловедении Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра Наноструктурированных композиционных материалов
E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, проф., директор Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра Наноструктурированных композиционных материалов
E-mail: s-nsm@mail.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в августе 2017 г.
© Ищенко А.В., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., 2017

Ishchenko A.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V.

FEATURES OF FIBER OF THE DIFFERENT COMPOSITION AS AN ELEMENT OF THE SELF-CLEANING SURFACE

The paper presents the results of the investigation of the characteristics of cement stone depending on the type of fiber as an element of a self-cleaning surface. The study of the contact angle of wetting of a horizontal surface, a surface at an angle of 70°, compressive strength of a cement stone with a different content of fiber and a hydrophobic additive are given. Four types of fibers of various composition were used for the study: basalt fiber, glass fiber, polypropylene fiber (MCF), polyvinyl alcohol fiber (PVA-fiber). Based on the obtained results it becomes possible to select the type and dosage of fiber depending on the purpose of the material, as well as the effectiveness of its joint use with volumetric hydrophobization. When designing self-cleaning facade materials, if it is necessary to achieve high values of the contact angle, it is recommended to use glass fiber (3 %) or PVA-fiber (3 %) with hydrophobic additive (1 %). If it is necessary to achieve high strength characteristics, it is recommended to use MRF (3 %) without hydrophobic additive. The optimal (average values of the contact angle of wetting and compressive strength) is the use of basalt fiber (3 %) without hydrophobic additive.

Keywords: *fiber, hydrophobic additive, cement stone, contact angle of wetting, strength.*

Information about the authors
Ischenko Alina Valentinivna, Postgraduate student.
E-mail: alina.ishchenko.92@mail.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ogurtsova Yulia Nikolaevna, Ph.D., Assistant professor.
E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Strokova Valeria Valerievna, Ph.D., Professor.
E-mail: s-nsm@mail.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in August 2017
© Ishchenko A.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., 2017