

Коррозионная стойкость армирующих волокон в материалах на основе портландцемента

Андрей Петрович ПУСТОВГАР, кандидат технических наук, e-mail: nsm.mgsu@mail.ru

Анастасия Юрьевна АБРАМОВА, аспирантка, зав. лабораторией физико-химического анализа, e-mail: abramova.mgsu@yandex.ru

Надежда Евгеньевна ЕРЁМИНА, студентка, e-mail: ereminane@mail.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Армирующие волокна для бетона следует выбирать исходя из функционального назначения конструкции и условий эксплуатации. Агрессивные среды, воздействующие на материал, способны негативно влиять на функциональную прочность и долговечность конструкции. В статье представлены результаты экспериментального исследования коррозионной стойкости стальных, базальтовых, стеклянных и полиолефиновых фиброволокон к щелочной среде цементно-песчаного раствора в условиях воздействия 100 циклов переменной температуры и повышенной влажности. Сравнительная оценка состояния волокон до и после испытаний производилась по анализу микрофотографий, полученных методом сканирующей электронной растровой микроскопии. Рассмотрены теоретические вопросы эффективного применения различных типов фиброволокон для дисперсного армирования бетонов. Практическая значимость научной работы по выявлению коррозионной стойкости армирующих волокон в цементно-песчаной матрице заключается в использовании результатов исследования для прогнозирования возможных последствий (рисков) при проведении различных видов работ.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, бетон, базальтовое волокно, полипропиленовое волокно, дисперсное армирование, фибра.

CORROSION RESISTANCE OF REINFORCING FIBERS IN MATERIALS BASED ON PORTLAND CEMENT

Andrey P. PUSTOVGAR, e-mail: nsm.mgsu@mail.ru

Anastasiya Yu. ABRAMOVA, e-mail: abramova.mgsu@yandex.ru

Nadezhda E. ERYOMINA, e-mail: ereminane@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The choice of reinforcing fibers for concrete should be determined based on the functional purpose of the structure and operating conditions. Aggressive media affecting the material can negatively influence on the functional strength and durability of the structure. The article presents the results of an experimental study of the corrosion resistance of steel, basalt, glass and polyolefin fibrous fibers to the alkaline medium of a cement-sand mortar under the influence of 100 cycles of variable temperature and high humidity. Comparative assessment of the state of the fibers before and after the tests was carried out by analyzing the microphotographies obtained by scanning electron scanning microscopy. Theoretical issues of the effective use of various types of fibrous fiber for dispersed concrete reinforcement are also considered. The practical significance of scientific work to identify the corrosion resistance of reinforcing fibers in a cement-sand matrix is to apply the research results in order to predict possible consequences (risks) during various types of work.

Key words: corrosion resistance, concrete, basalt fiber, polypropylene fiber, dispersed reinforcement, fiber.

Введение

Надежность и долговечность современных зданий и сооружений в значительной степени обеспечиваются за счет свойств применяемых бетонов. Один из способов повышения эксплуатационных характеристик бетона — дисперсное армирование, представляющее собой введение в бетонную смесь армирующих волокон (фибры) и равномерное их

распределение в объеме материала. Фиброволокно вводят в состав бетонов и строительных смесей для повышения прочности при растяжении и изгибе, ударной прочности, ударной вязкости и стойкости к усадочным деформациям, что обеспечивает более длительный срок службы строительных конструкций, в том числе и в сложных условиях эксплуатации [1, 2].

На эффективность дисперсного армирования оказывает влияние отношение модулей упругости материала макроволокна и цементной матрицы, расход волокон, химическая стойкость волокон по отношению к материалу матрицы, геометрические характеристики макроволокна (длина, диаметр, рельеф поверхности), соотношение размеров армирующих волокон с размера-

ми неоднородностей структуры матрицы [2]. От свойств материала волокна зависит область применения фибробетона и его характеристики. В качестве армирующего материала могут использоваться стальная проволока, стекловолокно, базальтовое волокно, а также полимерное волокно. Различные свойства материалов для дисперсного армирования обуславливают необходимость дифференцированного подхода к их применению [3–5].

Стальная фибра представляет собой отрезки проволоки из низкоуглеродной стали диаметром 0,7–1,2 мм и длиной 25–60 мм, с круглым или треугольным сечением, шероховатой поверхностью для улучшения сцепления с бетоном, а также с различной формой волокна — прямой, волнистой, анкерной (с изогнутыми концами). Дозировка стальной фибры подбирается в зависимости от назначения бетона и нагрузок на конструкции в процессе эксплуатации. Например, при незначительных нагрузках на конструкции количество стальной фибры может составлять 15–30 кг, а при высоких нагрузках — от 75–150 кг фибры на 1 м³ раствора [3].

Сталефибробетон обладает более высокими показателями прочности и долговечности по сравнению с обычным бетоном: прочность при растяжении при изгибе выше в 3,5–5 раз, морозостойкость — в 7 раз, водонепроницаемость — в 2 раза, показатель истираемости — ниже в 2 раза. Предел выносливости сталефибробетонных конструкций выше железобетонных на 30 %, а развитие трещин и разрушение наступает в 10 раз медленнее [3, 6]. Сталефибробетон применяют в качестве материала для шпал, фундаментов, мостовых покрытий, тротуарной плитки, бордюров, берегозащитных полос, тоннелей, дорог, полос для взлета и

посадки на аэродромах, каркасов конструкций, высотных монолитных сооружений, каналов для водоотвода, шахт колодцев под канализацию, плотин, водочистных систем.

Недостаток стальной фибры — низкая коррозионная стойкость в атмосферных условиях и агрессивных кислых средах [7], а также катодный эффект и нестойкость к агрессивной среде цементных растворов [8]. Присутствие в цементно-песчаных составах электролитов приводит к коррозии фибры, что обуславливает образование пустот, которые являются концентраторами напряжений, ведущими к снижению эксплуатационных свойств [9].

Для повышения долговечности сталефибробетона используют различные антикоррозионные пропитки, что ведет к удорожанию продукции [10–12]. Интересно отметить, что, по данным некоторых исследований [13], небольшая, до 2 % по массе, степень коррозии поверхности стальных волокон положительно влияет на способность фибры к перекрытию трещин за счет повышения сцепления волокна с цементной матрицей.

В отличие от стальных волокон, базальтовые волокна в 3 раза легче и, как правило, обладают более высокой коррозионной стойкостью. Базальтовая фибра — это отрезки базальтового волокна длиной от 1 до 150 мм и средним диаметром 16–18 мкм [14]. Опыт применения базальтового волокна показал [15], что при добавлении 1 кг базальтовой фибры на 1 м³ бетона процент брака фибробетона практически равен нулю: отсутствуют трещины и сколы на углах и гранях. По сравнению с неармированным бетоном, базальтофибробетон имеет прочность на раскалывание выше в 2 раза, прочность при изгибе — в 2–5 раз,

при сжатии — на 50 % [10]. При этом происходит вязкое разрушение фибробетона с преобладанием упругой и пластической деформации, тогда как неармированный бетон раскалывается на отдельные части [16].

Добавление в бетон базальтового волокна снижает его проницаемость и усадочные деформации при твердении, особенно на ранних сроках, что повышает сопротивление восприятию напряжений внутри бетона при переменном замораживании и оттаивании, т. е. увеличивает морозостойкость. При дозировке 2 кг базальтовой фибры на 1 м³ бетона конструкции приобретают сейсмостойкость и огнестойкость. Область применения базальтофибробетона очень разнообразна и включает в себя производство несъемной опалубки для укрепления свайных фундаментов, стеновых панелей, монолитных стен и межкомнатных перегородок, автодорог, хранилищ радиоактивных отходов, резервуаров, дамб, конструкций, которые работают в агрессивных средах и при повышенных температурах, в сейсмостойком и гидротехническом строительстве. Кроме того, фибробетон используется в производстве малых архитектурных форм, декоре и реконструкции зданий [8].

Базальтовые волокна устойчивы к агрессивным средам, могут эксплуатироваться при длительных воздействиях кислот, щелочей, атмосферных осадков и повышенной влажности. Имеют низкую гигроскопичность и высокую стойкость к температурам.

Однако, как подтверждают исследования, базальтовая фибра имеет более высокую стойкость к воздействию кислых сред, чем щелочных [17, 18], и под действием агрессивной цементной среды, в особенности содержащегося в поровом растворе цементного камня портландита

1. Характеристики фиброволокон

Показатели	Виды фибры				
	стальная	базальтовая	стеклянная (цирконийсо- держащая)	полиолефиновая	
				Concrix ES50	Fibrofor High Grade 190
Длина, мм	40-50	4-15	6-18	50	19
Диаметр, мкм	250-1200	10-17	12-15	500	-
Форма	Анкерная	Прямая	Прямая	Прямая с рельефной поверхностью	Фибриллированная
Плотность, г/см ³	7,5	2,7	2,6	0,91	0,91
Модуль упругости, ГПа	185	> 80	75	> 11	4,9
Прочность при растяжении, МПа	500-1500	3500	1600—3500	600	400

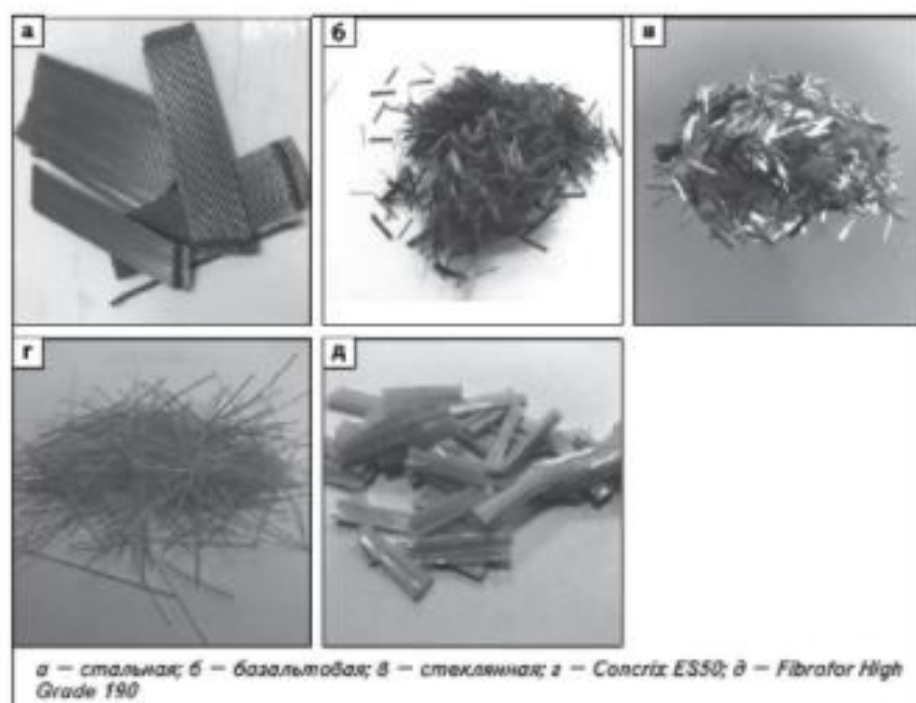


Рис. 1. Виды фибры

Ca(OH)₂, реагирует с получением новообразований. За счет этого диаметр базальтового волокна сначала увеличивается, а затем, в условиях длительного воздействия коррозионной среды, уменьшается с образованием дефектов на волокне [11, 14, 19, 20]. Происходит частичное разрушение волокна, величина которого зависит от времени воздействия. В среднем разрушение происходит на глубине до 4 мкм [7]. Прочность при растяжении волокон

после взаимодействия с раствором Ca(OH)₂ снижается [11].

Применение стеклянных волокон широко распространено при производстве реставрационных и ремонтных работ, в частности при отделке фасадов и различных декоративных элементов, и особенно для изготовления изделий изогнутых форм. Кроме того, стеклянную фибру используют в составе сверхпрочных бетонов [21, 22]. Стеклянная фибра имеет диаметр 10–18 мкм и дли-

ну 3–40 мм, варьируемую в зависимости от области применения, и отличается небольшим удельным весом, высоким пределом прочности при растяжении и высоким модулем упругости [23]. Дозировка стеклянной фибры в составах бетона сильно зависит от их типа и условий применения. Например, оптимальное содержание стеклянной фибры в составе сверхпрочных бетонов составляет 2–5 % [22, 24].

Недостатком стеклянных волокон считается низкая коррозионная стойкость к щелочным растворам [15, 25]. Это негативно сказывается на долговечности стеклянной фибры в материалах на основе портландцемента, где снижение ее свойств происходит за счет образования гидрата Ca(OH)₂ в процессе гидратации. Портландит придает поровому раствору в цементном камне pH около 12,6.

В щелочной среде гидроксильные ионы относительно быстро разрушают связи Si–O–Si в структуре стекла, что ведет к потере стекломассы и прочности. Помимо этого, портландит образует большие кристаллы, которые заполняют пространство между и вокруг волокон стеклянной фибры, что приводит к локальной концентрации напряжений на поверхно-

2. Программа одного цикла климатического воздействия

Тип камеры	Время выдерживания, ч	Температура, °С	Влажность W, %
Камера влаги	10	55 ± 2	97 ± 3
	2	20	97
Термокамера	10	60 ± 2	—
	2	от 15 до 30	не более 80

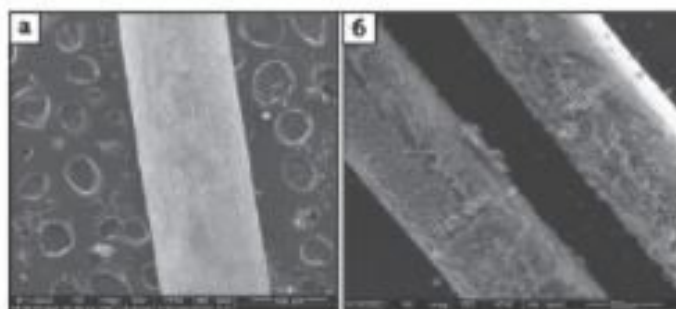


Рис. 2. Микрофотографии стальной фибры до испытаний (а) и после испытаний (б)

сти волокон под воздействием нагрузки и, как следствие, к повышению хрупкости стеклофибробетона [26]. Один из способов повышения стойкости стеклянной фибры — ее изготовление из стекла с высоким (около 16 % по массе) содержанием оксида циркония. Подобная фибра считается щелочестойкой, однако имеет высокую стоимость [27, 28].

В настоящее время активное применение в фибробетоне получило полимерное волокно из полиолефинов (полиэтилен и полипропилен), полиакрилонитрила и полиамида. Синтетические волокна, получаемые на основе полипропилена, представляют собой волокна диаметром 10–500 мкм и длиной 6–50 мм с жесткой шероховатой поверхностью. Полипропиленовые волокна химически инертны, устойчивы к гниению, негигроскопичны, обладают низким удельным весом [7, 29]. Их введение в состав бетонной смеси приводит к снижению водоотделения, повышению прочности при растяжении

при изгибе, остаточного сопротивления растяжению при изгибе, улучшению стойкости к ударному воздействию, истираемости, трещиностойкости, морозостойкости.

Исследования показывают [30], что полиолефиновые волокна снижают трещинообразование в бетоне на 70 %. Дозировка волокон на 1 м³ бетона составляет 0,9–7,5 кг. Несмотря на все достоинства полимерных волокон, существует трудность их равномерного распределения в объеме бетонной смеси, что может оказывать негативное влияние на свойства мелкозернистого бетона за счет образования комков фибры и получения материала с неоднородной структурой [9].

Фибробетон с полипропиленовой фиброй применяется при устройстве цементобетонных дорожных покрытий, рулежных дорожек аэродромов, для изготовления железобетонных конструкций и мелкоштучных изделий сложной формы, несъемной опалубки, тротуарной плитки, пе-

ноблоков и газоблоков, промышленных полов, стяжек полов, в том числе обогреваемых полов [31, 32]. Полипропиленовую фибру используют при производстве штукатурных и ремонтных сухих строительных смесей и торкрет-бетона.

Высокая химическая стойкость полипропиленовых волокон, в том числе к щелочной среде, является значительным преимуществом для их применения в составах на основе портландцемента. Так, по результатам испытаний полимерных двухкомпонентных волокон Copcrix в агрессивных средах было доказано, что данная фибра является химически стойкой [33]. По результатам исследований [7, 31], следов коррозии на полипропиленовых волокнах в составе фибробетона также не было обнаружено.

Цель исследовательской работы — оценка коррозионной стойкости армирующих волокон различного вида в условиях воздействия переменной температуры и повышенной влажности.

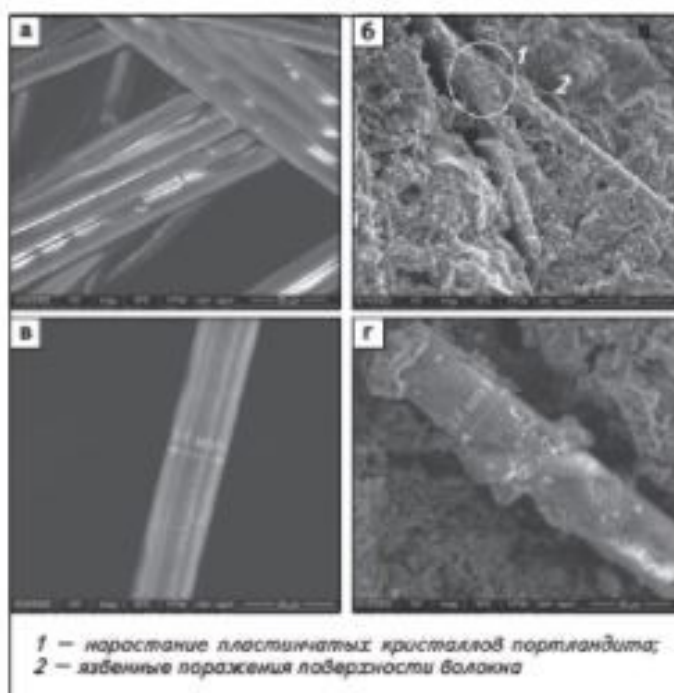


Рис. 3. Микрофотографии базальтовой фибры до испытаний (а, в) и после испытаний (б, г)

Материалы и методы исследования

На базе Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий НИУ МГСУ было проведено исследование коррозионной стойкости различных видов армирующих волокон к матрице на основе портландцемента в условиях воздействия переменной температуры и повышенной влажности (тропического климата). Исследованию подвергались стальные, базальтовые, стеклянные волокна, а также полиолефиновая двухкомпонентная макрофибра Copcrix ES50 и полиолефиновая микрофибра Fibrofor High Grade 190. Характеристики фибры представлены в табл. 1, внешний вид — на рис. 1.

Минералогический состав используемого портландцемента 500 Д0, содержание, % по массе

Алит C_3S	73,8
Белит C_2S	10,3
Трехкальциевый алюминат C_3A	3,6
Четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF	9,8
Доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$	2,5

Исследование коррозионной стойкости фиброволокон производили следующим образом. Фиброволокно вводили в состав цементно-песчаного раствора, приготовление которого осуществлялось по ГОСТ Р 58277—2018 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний». Раствор укладывали в форму размером $160 \times 40 \times 10$ мм в один прием, избыток смеси срезами металлической линейкой уровень с краями формы. Уложенную смесь уплотняли и выравнивали пятью ударами формы о поверхность стола, поднимая ее на высоту 10 мм. Было изготовлено по два образца-пластины цементно-песчаного раствора с каждым типом фиброволокна.

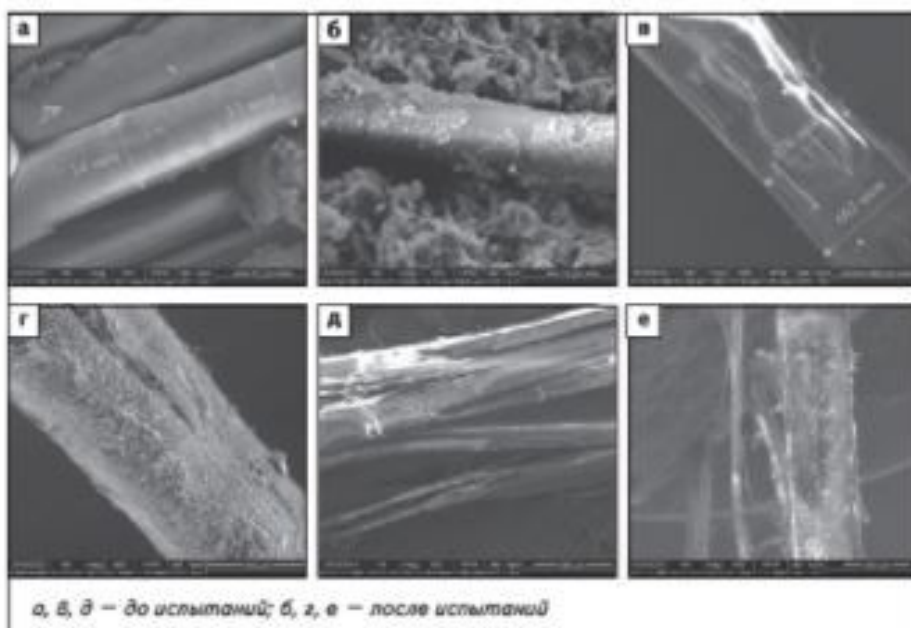


Рис. 4. Микрофотографии стеклянной фибры (а, б), полиолефиновой макрофибры Copcrix ES50 (в, г) и полиолефиновой микрофибры Fibrofor High Grade 190 (д, е)

Рецептура цементно-песчаного раствора с добавлением фиброволокна, содержание, % по массе

Цемент 500 Д0	65
Песок (фракции 0,315—0,63 мм)	35
Фиброволокно	0,5
Водотвердое отношение	21

Пластины выдерживали в камере нормального твердения 7 сут, затем подвергали 100 циклам воздействия переменной температуры и повышенной влажности по методу 14 ГОСТ 9.401—2018 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов» для условий эксплуатации Т2 и Т3 (тропические). Программа одного цикла климатического воздействия приведена в табл. 2.

По окончании 100 циклов пластины раскалывали молотком и отбирали наиболее удачные образцы с параллельными ровными гранями площадью не более 25 мм^2 для последующего исследо-

вания их под микроскопом. Слишком длинные волокна при необходимости извлекали из цементно-песчаного раствора или подрезали.

Исследование коррозионной стойкости фиброволокон производили путем сравнительной оценки их качества до и после воздействия на них щелочной среды цементно-песчаной матрицы в условиях переменной температуры и повышенной влажности. Состояние волокон изучали по микрофотографиям, полученным с применением растрового электронного микроскопа Quanta 200.

Результаты исследования

Микрофотографии стальной фибры, характеризующие ее состояние до и после воздействия коррозионной среды и переменных температуры и влажности, представлены на рис. 2. На всей поверхности волокон, извлеченных из цементно-песчаных пластин, наблюдаются следы легкой коррозии верхнего слоя, при этом диаметр волокна не подвергся заметным изменениям.

При сравнении микрофотографий базальтовой фибры до и после испытания (рис. 3) можно отметить значительное увеличение диаметра волокон на множественных участках за счет нарастания на них продуктов гидратации портландцемента, например, пластинчатых кристаллов портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (зона 1, рис. 3б). При этом на отдельных частях волокна можно увидеть язвенные поражения его поверхности (зона 2, рис. 3б).

По результатам испытания стеклянной фибры, характерные микрофотографии которой представлены на рис. 4а, б можно отметить незначительное количество изменений в виде язвенных образований при отсутствии изменений в диаметре волокон и трещин. Поверхность стекловолокна покрыта тонким слоем продуктов гидратации портландцемента.

Волокна полиолефиновой двухкомпонентной макрофибры Concrx ES50, извлеченные из цементно-песчаных пластин после 100 циклов климатического воздействия, были пропитаны материалом затвердевшей цементной матрицы и не подверглись заметным изменениям диаметра волокна или коррозионным изменениям его поверхности (рис. 4в, г). Микрофотографии полиолефиновой микрофибры Fibrofor High Grade 190 до и после испытания приведены на рис. 4д, е.

Как и в случае с двухкомпонентной макрофиброй Concrx ES50, волокна микрофибры Fibrofor High Grade 190 не были подвержены коррозии. На их поверхности обнаружены лишь небольшие следы от соприкосновения с продуктами гидратации цементной матрицы.

Вывод

Проведенные исследования коррозионной стойкости различных фиброволокон в материалах на основе портландцемента после воздействия на них 100 циклов переменной температуры и повышенной влажности показали, что полиолефиновая фибра не подверглась заметным коррозионным поражениям. У стальной и стеклянной фибры наблюдались следы легкой коррозии поверхности без изменения диаметра волокон. Значительные изменения качества волокон были зафиксированы у базальтовой фибры, включая язвенные разрушения поверхности волокна и его утолщение вследствие нарастания кристаллов портландита, что коррелируется с результатами, полученными другими исследователями [11, 14, 20, 21].

ЛИТЕРАТУРА

- Guo Zh., Wan Ch., Xu M., Chen J. Review of basalt fiber-reinforced concrete in China: alkali resistance of fibers and static mechanical properties of composites [Обзор базальтового фибробетона в Китае: щелочная стойкость волокон и статические механические свойства композитов] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 4. Pp. 1–11. DOI 10.1155/2018/9198656.
- Смирнова О. М. Влияние дисперсного армирования синтетическим макроволокном на прочность дорожного бетона // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2016. № 3. Т. 2. С. 15–19.
- Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. М.: АСВ, 2004. 560 с.
- Клюев С. В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // *Строительная механика неконечных конструкций и сооружений*. 2011. № 4. С. 71–74.
- Saje D., Bandelj B., Sustersic J. et al. Shrinkage and creep of steel fiber reinforced normal strength concrete [Усадка и ползучесть бетона нормальной прочности, армированного стальной фиброй] // *Journal of Testing and Evaluation*. 2013. Vol. 41. No. 6. Pp. 1–11.
- Леснов В. В., Ерофеев В. Т. Исследование свойств каркасных композитов, армированных металлической фиброй различных видов // *Вестник ВолгГАСУ*. 2013. № 3(28). С. 1–8.
- Пустовгар А. П., Абрамова А. Ю., Еремина Н. Е. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй // *Технологии бетонов*. 2019. № 7–8. С. 48–56.
- Новицкий А. Г., Ефремов М. В. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2010_36_5 (дата обращения: 10.03.2021).
- Коровкин М. О., Ерошкина Н. А., Ямбукова А. Р. Исследование эффективности полимерной фибры в мелкозернистом бетоне // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2017/4164 (дата обращения: 10.03.2021).
- Московский С. В., Носков А. С., Руднов В. С., Алехин В. Н. Влияние дисперсного армирования на деформационно-прочностные свойства бетона // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2016. № 3. С. 67–71.
- Иванов Л. А. О результатах диссертационных исследований в области нанотехнологий и наноматериалов // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2016. Т. 2. № 4. С. 1–6.
- Son M. Corrosion protection method of steel fibers [Метод защиты от коррозии стальной фибры]. Patent CN 103787603 A. Suzhou Institute of Technology, China. Publ. 14.05.2014.
- Yoo D.-Y.I, Gim J. Y., Chun B. Effects of rust layer and corrosion degree on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete [Влияние слоя и степени коррозии на вытягивание стальной фибры из сверхвысокопрочного бетона] // *Journal of*

- Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Iss. 3. Pp. 3632–3648. DOI 10.1016/j.jmrt.2020.01.101.
14. Новицкий А. Г. Химическая стойкость базальтовых волокон для армирования бетонов // Хімічна промисловість України. 2003. № 3. С. 16–19.
 15. Аль Хашими О. И. М. Базальтовая фибра: перспективы применения // Технологии бетонов. 2014. № 6. С. 13–15.
 16. Серова Р. Ф., Рахимова Г. М., Стасюкович Е. А., Айдарбекова С. Ж. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов // Эпоха науки. 2018. № 14. С. 192–200.
 17. Elshafie S., Whittleston G. Evaluating the efficiency of basalt and glass fibres on resisting the alkaline, acid and thermal environments [Оценка эффективности базальтовых и стеклянных волокон по устойчивости к щелочной, кислотной и термической средам] // American Journal of Materials Science. 2016. No. 6 (1). Pp. 19–3. DOI 10.5923/j.materials.20160601.02.
 18. Knofko A. V., Pustovgar E. A., Garshev A. V., Pulyaev V. I., Trefyakov Y. D. A protective diffusion layer formed on surface of basaltic fiberglass during oxidizing [Защитный диффузионный слой, образующийся на поверхности базальтового стекловолокна при окислении] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2011. No. 47(5). Pp. 658–661. DOI: 10.1134/S2070205111050091.
 19. Пащенко А. А., Сербин В. П., Пасласская А. П. [и др.]. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами. М.: Стройиздат, 1988. 201 с.
 20. Бабаев В. Б., Строкова В. В., Нелюбова В. В., Савгир Н. Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 2. С. 63–66.
 21. Чохели Т. Р. Дисперсное армирование бетонов // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2019. № 5(62). С. 87–90.
 22. Holubová B. Corrosion of glass fibres in ultra high performance concrete and normal strength concrete [Коррозия стекловолокна в бетоне со сверхвысокими характеристиками и в бетоне нормальной прочности] // Ceramics – Sílkaty. 2017. No. 61. Pp. 1–9. DOI:10.13168/cs.2017.0031.
 23. Zanotti C., Bantia N., Plizzari G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs [Исследование некоторых факторов, влияющих на сцепление при ремонте цементными смесями с армирующими волокнами] // Cement Concrete Research. 2014. No. 63. Pp. 117–126. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.05.008.
 24. Rigaud S., Charvillard G., Chen J. Characterization of bending and tensile behaviours of ultra-high performance concrete containing glass fibres [Характеристика поведения при изгибе и растяжении сверхвысокопрочного бетона, содержащего стекловолокно] // Proceedings of High Performance Fibre Reinforced Cement Composites. Rilem Bookseries, 2012. Pp. 373–380.
 25. Саламаха Л. В., Кушнир Е. Г., Богун А. И. Влияние параметров стекловолокон на физико-механические характеристики стеклоцементных композиций // Вісник ПДАБА. 2011. № 1–2. С. 30–36.
 26. Charles R. J. Static fatigue of glass [Статическая усталость стекловолокна] // Journal of Applied Physics. 1958. No. 29. Pp. 1549–1560. DOI 10.1063/1.1722991.
 27. Majumdar A. J. Improvements in or relating to glass fibres and compositions containing glass fibres [Улучшение свойств в стеклянных волокнах или в композициях, содержащих стеклянные волокна] // National Research Development Corp, UK Patent 1 243 972. 1971.
 28. Клюев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 7–9.
 29. Ding Ch., Wu Ch., Meng Zh., Fang G. Mechanical properties and characteristic analysis of the new concave-convex polypropylene macro fiber [Механические свойства и анализ характеристик нового вогнуто-выпуклого полипропиленового макроволокна] // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2019. Vol. 14. Pp. 1–7.
 30. Lin W., Cheng A. Effect of polyolefin fibers and supplementary cementitious materials on corrosion behavior of cement-based composites [Влияние полиолефиновых волокон и дополнительных цементных материалов на коррозионное поведение композитов на цементной основе] // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2013. No. 23. Pp. 888–896. DOI 10.1007/s10904-013-9866-1.
 31. Смирнова О. М., Андреева Е. В. Свойства тяжелого бетона, дисперсно-армированного синтетическим микроволокном // Строительные материалы. 2016. № 10. С. 1–4.
 32. Богданова Е. Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсно-армированного синтетической полипропиленовой фиброй // Известия ПГУПС. 2015. № 2. С. 91–98.
 33. Кауфманн Д., Мансер М. Изменение прочности двухкомпонентных полимерных волокон при ползучести и в агрессивных средах // Метро и тоннели. 2015. № 4. С. 30–35.

REFERENCES

1. Guo Zh., Wan Ch., Xu M., Chen J. Review of basalt fiber-reinforced concrete in China: alkali resistance of fibers and static mechanical properties of composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 4, pp. 1–11. DOI 10.1155/2018/9198656.
2. Smirnova O. M. Effect of dispersed reinforcement with synthetic microfibre on the strength of road concrete. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*, 2016, no. 3, vol. 2, pp. 15–19. (In Russian).
3. Rabinovich F. N. *Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov* [Composites based on dispersed-reinforced concrete]. Moscow, ASV Publ., 2004. 560 p. (In Russian).

4. Klyuev S. V. Experimental studies of fiber-reinforced concrete structures. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*, 2011, no. 4, pp. 71–74. (In Russian).
5. Saje D., Bandelj B., Sustersic J. et al. Shrinkage and creep of steel fiber reinforced normal strength concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 2013, vol. 41, no. 6, pp. 1–11.
6. Lesnov V. V., Erofeev V. T. Investigation of the properties of frame composites reinforced with various types of metal fiber. *Vestnik VolgGASU*, 2013, no. 3(28), pp. 1–8. (In Russian).
7. Pustovgar A. P., Abramova A. Yu., Eremina N. E. Efficiency of the use of dispersed reinforcement of concrete and mortar with polypropylene and basalt fiber. *Tekhnologii betonov*, 2019, no. 7-8, pp. 48–56. (In Russian).
8. Novitskiy A. G., Efremov M. V. Aspects of the use of basalt fiber for concrete reinforcement. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2010_36_5 (accessed 10.03.2021). (In Russian).
9. Korovkin M. O., Eroshkina N. A., Yanbukova A. R. Investigation of the effectiveness of polymer fiber in fine-grained concrete. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2017, no. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4164 (accessed 10.03.2021). (In Russian).
10. Moskovskiy S. V., Noskov A. S., Rudnov V. S., Alekhin V. N. Influence of dispersed reinforcement on the deformation and strength properties of concrete. *Akademiicheskiy vestnik UralNIiproekt RAASN*, 2016, no. 3, pp. 67–71. (In Russian).
11. Ivanov L. A. On the results of dissertation research in the field of nanotechnology and nanomaterials. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 1–6. (In Russian).
12. Son M. Corrosion protection method of steel fibers. Patent CN 103787603 A. Suzhou Institute of Technology, China. Publ. 14.05.2014.
13. Yoo D.-Y.J., Gim J. Y., Chun B. Effects of rust layer and corrosion degree on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, iss. 3, pp. 3632–3648. DOI 10.1016/j.jmrt.2020.01.101.
14. Novitskiy A. G. Chemical resistance of basalt fibers for concrete reinforcement. *Himicheskaya promyshlennost' Ukrainy*, 2003, no. 3, pp. 16–19. (In Russian).
15. Al Hashimi O. I. M. Basalt fiber: application prospects. *Tekhnologii betonov*, 2014, no. 6, pp. 13–15. (In Russian).
16. Serova R. F., Rahimova G. M., Stasilovich E. A., Ajdarbekova S. Zh. Investigation of physical and mechanical properties of dispersed-reinforced concrete. *Epoha nauki*, 2018, no. 14, pp. 192–200. (In Russian).
17. Elshafie S., Whittleston G. Evaluating the efficiency of basalt and glass fibres on resisting the alkaline, acid and thermal environments. *American Journal of Materials Science*, 2016, no. 6 (1), pp. 19–3. DOI 10.5923/j.materials.20160601.02.
18. Knotko A. V., Pustovgar E. A., Garshev A. V., Putlyaev V. I., Tretyakov Y. D. A protective diffusion layer formed on surface of basaltic fiberglass during oxidizing. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2011, no. 47(5), pp. 658–661. DOI: 10.1134/S2070205111050091.
19. Pashchenko A. A., Serbin V. P., Paslasskaya A. P. et al. *Armirovaniye neorganicheskikh vyazhushchikh veshchestv mineral'nymi voloknami* [Reinforcement of inorganic binders with mineral fibers]. Moscow, Strojizdat Publ., 1988. 201 p. (In Russian).
20. Babaev V. B., Strokova V. V., Nelyubova V. V., Savgir N. L. On the question of the alkali resistance of basalt fiber in the cement system. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 2013, no. 2, pp. 63–66. (In Russian).
21. Choheli T. R. Dispersed concrete reinforcement. *EvrAzijskiy soyuz uchenykh (ESU)*, 2019, no. 5(62), pp. 87–90. (In Russian).
22. Holubová B. Corrosion of glass fibres in ultra high performance concrete and normal strength concrete. *Ceramics – Silikaty*, 2017, no. 61, pp. 1–9. DOI:10.13168/cs.2017.0031.
23. Zanotti C., Banthia N., Plizzari G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement Concrete Research*, 2014, no. 63, pp. 117–126. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.05.008.
24. Rigaud S., Charvillard G, Chen J. Characterization of bending and tensile behaviours of ultra-high performance concrete containing glass fibres. *Proc. of High Performance Fibre Reinforced Cement Composites. Rilem Bookseries*, 2012, pp. 3730–380.
25. Salamaha L. V., Kushnir E. G., Begun A. I. Influence of glass fiber parameters on the physical and mechanical characteristics of glass-cement compositions. *Visnik PDABA*, 2011, no. 1–2, pp. 30–36. (In Russian).
26. Charles R. J. Static fatigue of glass. *Journal of Applied Physics*, 1958, no. 29, pp. 1549–1560. DOI 10.1063/1.1722991.
27. Majumdar A. J. Improvements in or relating to glass fibres and compositions containing glass fibres. *National Research Development Corp*, UK Patent 1 243 972. 1971.
28. Klyuev S. V., Lesovik R. V. Dispersed-reinforced fine-grained concrete using polypropylene fiber. *Beton i zhelezobeton*, 2011, no. 3, pp. 7–9. (In Russian).
29. Ding Ch., Wu Ch., Meng Zh., Fang G. Mechanical properties and characteristic analysis of the new concave-convex polypropylene macro fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019, vol. 14, pp. 1–7.
30. Lin W., Cheng A. Effect of polyolefin fibers and supplementary cementitious materials on corrosion behavior of cement-based composites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2013, no. 23, pp. 888–896. DOI 10.1007/s10904-013-9866-1.
31. Smirnova O. M., Andreeva E. V. Properties of heavy concrete dispersed reinforced with synthetic microfibre. *Stroitel'nye materialy*, 2016, no. 10, pp. 1–4. (In Russian).
32. Bogdanova E. R. Experimental studies of concrete



dispersed-reinforced with synthetic polypropylene fiber. *Izvestiya PGUPS*, 2015, no. 2, pp. 91–98. (In Russian).

two-component polymer fibers during creep and in aggressive environments. *Metro i tonneli*, 2015, no. 4, pp. 30–35. (In Russian).

33. Kaufmann D., Manser M. Changes in the strength of

Для цитирования: Пустовгар А. П., Абрамова А. Ю., Ерёмина Н. Е. Коррозионная стойкость армирующих волокон в материалах на основе портландцемента // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 69–77. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.03.69-77.

For citation: Pustovgar A. P., Abramova A. Yu., Eryomina N. E. Corrosion Resistance of Reinforcing Fibers in Materials Based on Portland Cement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 3, pp. 69–77. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.03.69-77. _____ ■