

УДК 691.328.43:6–022.532

К.А. САРАЙКИНА¹, магистр техники и технологии по направлению «Строительство» (Ksenya_s2004@mail.ru),
В.А. ГОЛУБЕВ¹, канд. техн. наук; Г.И. ЯКОВЛЕВ², д-р техн. наук (jakowlew@udm.net);
С.А. СЕНЬКОВ¹, канд. техн. наук (ssa@cems.pstu.ru); А.И. ПОЛИТАЕВА², магистрант 2-го курса

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426069, Удмуртская Республика,
г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном

В современном строительстве наиболее широкое распространение получил цементный бетон. Однако данный композит характеризуется рядом негативных параметров, среди которых низкие предельные деформации при растяжении. Для увеличения их показателей, а также для повышения стойкости к истиранию, скалыванию и ударным воздействиям возможно применение различных технологических приемов, среди которых наиболее перспективным методом можно считать дисперсное армирование цементной матрицы базальтовыми волокнами. Для повышения стойкости базальтового волокна в сильнощелочной среде выдвинута гипотеза о целесообразности введения в смесь дисперсии модифицированных углеродных нанотрубок (МУНТ). Представлены результаты микроскопического анализа структуры цементно-песчаного раствора при совместном введении базальтовых волокон и дисперсии МУНТ, которые показывают, что, несмотря на недостаточную однородность дисперсии МУНТ, в зоне контакта цементного камня, базальтового волокна и нанотрубок кристаллизуются плотные новообразования, улучшается сцепление цементного камня с базальтовым волокном, уменьшаются усадочные трещины.

Ключевые слова: дисперсное армирование, базальтовые волокна, углеродные нанотрубки, модификация, усадочные деформации.

K.A. SARAİKINA¹, Master of Engineering and Technology in Construction (Ksenya_s2004@mail.ru); V.A. GOLUBEV¹, Candidate of Sciences (Engineering);
G.I. YAKOVLEV², Doctor of Sciences (Engineering) (jakowlew@udm.net); S.A. SEN'KOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (ssa@cems.pstu.ru);
A.I. POLITAEVA², Undergraduate

¹ Perm State National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Avenue, Perm, 614990, Russian Federation)

² Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Nanostructuring of Cement Stone at Disperse Reinforcing with Basalt Fiber

Cement concrete is the most widely distributed material in the present construction. But this composite is characterized by a series of negative parameters, low ultimate tensile strains are among them. To improve their performance and also to increase the resistance to abrasion, chilling, and impact actions it is possible to apply various techniques, disperse reinforcement of the cement matrix with basalt fiber is the most prospective method among them. To increase the resistance of basalt fiber to a strongly alkali environment a hypothesis about the reasonability to introduce the dispersion of modified carbon nanotubes (MCNT) into the mix has been put forward. Results of the microscopic analysis of the structure of cement-sand mortar in the course of joint introduction of basalt fibers and MCNT dispersion are presented; they show that, despite the lack of homogeneity of the MCNT dispersion, a dense new growth is crystallized, the adhesion of the cement stone with basalt fiber is improved, and shrinkage cracks are reduced in the zone of the contact of cement stone, basalt fiber, and nanotubes.

Keywords: disperse reinforcement, basalt fiber, carbon nanotubes, modification, shrinking deformations.

Во второй половине прошлого столетия в области конструкционного материаловедения получило развитие новое направление, связанное с созданием эффективных композиционных (композитных) материалов, получающих затем широкое распространение в технике.

Области технического использования композиционных материалов весьма обширны, от автомобилестроения, авиационной и космической техники до искусственных костей, бытовых аксессуаров и спортивного инвентаря. Основой этих материалов являются металлические, полимерные, керамические и другие подобные разновидности матриц, для которых в качестве армирующих компонентов используются высокопрочные искусственные наполнители органического и неорганического происхождения [1].

Желаемый комплекс свойств в композиционных материалах достигается, как правило, не за счет создания какого-то нового вещества, а за счет удачного сочетания в одном материале известных веществ. Выгоды от применения таких композиций очевидны — материал с новым сочетанием свойств не надо заново разрабатывать и налаживать его производство. Еще одно важное достоинство композитов — относительно низкая стоимость, она исходит из невысокой стоимости применяемых наполнителей — здесь часто пригодны даже техногенные материалы. Кроме того, наполнитель экономит связующее вещество [2].

In the second half of the last century in the field of structural materials science has developed a new direction associated with the creation of effective composite (composite) materials are currently receiving widespread in the technic.

Fields of the technical using of composite materials are extensive: from the automotive, aviation and space technology to artificial bones, household accessories and sports equipment. The basis of these materials is metal, polymer, ceramic and other similar species matrices for which the reinforcing components are used high-strength organic and inorganic fillers [1].

Necessary properties in the composites achieved, as a rule, not by creating of a new substance, and due to the successful combination of a single material of known substances. Benefits of using such compositions are obvious — the new material combination of properties is not necessary to re-establish and develop its production. Another important advantage of composites is a relatively low cost, it comes from the low cost using fillers — man-made materials often suitable. Further, the binder excipient saves [2].

Building is one of the most material and energy-intensive industrial activity around the world. The most accessible and widely used material in the construction is a cement concrete with the necessary technological properties in the molding designs, and it could serve a basis for the creation of effective

Строительство представляет одну из наиболее материало- и энергоемких отраслей производственной деятельности во всем мире. Наиболее доступным и широко применяемым материалом в строительстве является цементный бетон, обладающий необходимыми технологическими свойствами при формировании конструкций, и именно бетон мог бы служить основой для создания эффективных разновидностей композиционных материалов, приемлемых в строительном производстве.

Бетон обладает определенными специфическими свойствами, характеризующими его как хрупкое твердое тело с химически активной щелочной средой, возникающей в его структуре в процессе гидратации портландцемента. Бетон является гетерогенным материалом с весьма неоднородной структурой его строения. Предельные деформации бетона при растяжении существенно ниже, чем, например, у стали, стекла и полимерных материалов. Эти свойства бетона определяют необходимость решения задач современного материаловедения, относящихся к установлению оптимальных условий совмещения цементной матрицы с различными видами армирующих компонентов, технические характеристики которых (прочность, модуль упругости, предельные деформации при растяжении, сопротивление к воздействиям щелочной среды) изменяются в широком диапазоне [1].

Ликвидировать образование трещин в бетоне можно несколькими способами, например вторичным армированием, которое в конструкционном цементном бетоне осуществляется стальной арматурой, либо дисперсным армированием цементной матрицы в бетоне с помощью полипропиленовых, стеклянных, базальтовых или металлических волокон. Одним из прогрессивных и перспективных способов представляется использование базальтового волокна при вторичном армировании. Данный способ является дополнительным при использовании пространственного арматурного каркаса из стали, позволяя экономить металл.

Основные преимущества волокна, применяемого для вторичного армирования, связаны со снижением расслаиваемости бетонной смеси и образования усадочных трещин в процессе твердения бетона. Кроме того, бетонам с использованием волокна для дисперсного армирования присущи такие свойства, как повышенная устойчивость к истиранию, скалыванию и ударным воздействиям, пониженная проницаемость, повышенная долговечность в условиях замораживания-оттаивания.

Структура бетона с применением базальтовых волокон (базальтоцемента) близка к структуре цемента, армированного стальной сеткой. Однако базальтоцемент обладает более высокой прочностью и деформативностью, так как армирующее его базальтовое волокно обеспечивает большую однородность армирования цементного камня, а само базальтовое волокно обладает более высокой прочностью (1800–2500 МПа), чем стальная сетка. Кроме того, базальтоцемент может переносить большие упругие деформации, потому что базальтовое волокно не имеет пластических деформаций при растяжении, а по модулю упругости превосходит сталь [3].

Изготовленное из горных пород, базальтовое волокно не вступает в реакцию с кислотами и водой, однако его недостаточная стойкость к воздействию щелочной среды в большинстве случаев является препятствием в широком применении для армирования цементных бетонов.

К настоящему времени единого мнения о механизме разрушения базальтовых стекол щелочами не существует. Некоторые исследователи считают [4], что действие щелочных растворов сводится к постепенному растворению стекла начиная с его поверхности, без образования защитной пленки. Предполагается, что если катионы щелочного раствора образуют с продуктами разрушения стекла нерастворимые в щелочной среде соеди-

varieties of composite materials that are acceptable in the construction industry.

Concrete has certain specific properties that characterize it as a brittle solid with reactive alkaline medium, resulting in its structure during the hydration of Portland cement. Concrete is a heterogeneous material with a very non-homogeneous structure its morphology. Limit concrete tensile deformation is significantly lower than, for example, steel, glass and polymeric materials. These properties of concrete necessitate solving problems of modern materials relating to the establishment of optimal conditions for combining the cement matrix with different types of reinforcement components, specifications which (strength, modulus of elasticity, limiting tensile strain, alkali resistance) vary over a wide range [1].

The formation of cracks in the concrete eliminate in several ways, for example, a secondary reinforcement, which are contraction of cement concrete the steel reinforcement or particulate reinforcement for polypropylene, glass, metal or basalt fibers. One of the most progressive and promising methods is the use of basalt fiber in the secondary reinforcement. This method is optional when using spatial reinforcement cage made of steel, saving metal.

The main benefits of reinforced basalt fiber associated with reduced peelability and concrete shrinkage cracking during curing of the concrete. In addition, the basalt fiber concrete inherent properties such as increased resistance to abrasion, chipping and shock effects, low permeability, increased durability under freeze-thaw cycles.

The structure of basalt fiber concrete close to the steel reinforced cement structure. However basalt fiber concrete has higher strength and deformability, as reinforcing basalt fiber provides greater uniformity of cement stone and basalt fiber has a high strength (1800–2500 MPa) than steel mesh. Furthermore, basalt fiber concrete can carry large elastic deformation because the basalt fiber hasn't tensile plastic strain, and modulus of elasticity than steel [3].

Made of rocks, basalt fiber doesn't react with acids and water, but the low alkali resistance of basalt fiber in most cases is an obstacle to the widespread use of basalt fibers for reinforcement of cement concrete.

At the present moment no consensus on the mechanism of alkali basalt glasses destruction doesn't exist. Some researchers consider [4], that the action of alkaline solutions amounts to the gradual dissolution of the glass from its surface, without forming a protective film. Assumed that, when cations of the alkaline solution form with breakage products in alkaline environment insoluble compound, on the surface of the glass film is formed, further retarding its destruction.

Another point of view is to ensure that the solutions of alkalis, reacting silica framework constituting the fiber glass is completely dissolved [5].

On the basis of previous research by the authors [6] found that sheath occurs around the fiber at the interface the interaction of basalt glass and cement paste. It consists of products of the interaction. It should be noted that the structure of neoplasm is microcrystalline, solid, short-cubic shapes. At the same time, the chemical and phase composition of tumors correspond to hydrosilicates, hydroaluminate, hydroferrite of calcium, which are formed at minerals hydration of Portland cement. However, the fiber can be easily separated from the shell, thus, the adhesion of the sheath to the fiber is lower than the cement stone, whereby basalt fiber can't work as a reinforcing component that enhances crack resistance. Thus, for the application of particulate reinforcement must ensure the preservation of basalt fibers in an alkaline environment and improve the adhesion of the fibers with the cement stone.

In the analysis of existing methods of protection basalt fiber leach [7–10] that the above method is very time

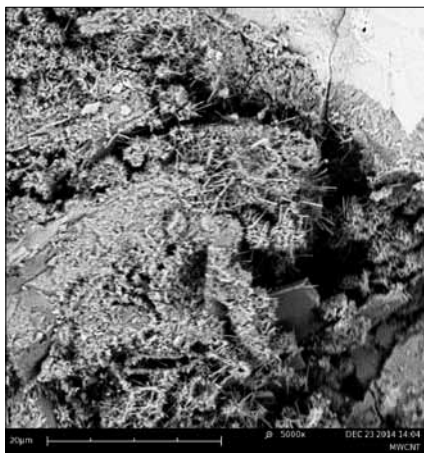


Рис. 1. Микроструктура гидратированного цементно-песчаного раствора в контрольном образце (увеличение $\times 5000$)

Fig. 1. The microstructure of hydrated cement-sand mortar in the control sample (magnification $\times 5000$)

нения, то на поверхности стекла формируется пленка, тормозящая его дальнейшее разрушение.

Другая точка зрения сводится к тому, что растворы щелочей, реагируя с кремнеземом, составляющим каркас волокна, растворяют стекло полностью [5].

На основании ранее проведенных исследований [6] установлено, что при взаимодействии базальтового стекловолокна и цементного камня на границе раздела сред вокруг волокна возникает оболочка, состоящая из продуктов взаимодействия. Необходимо отметить, что структура новообразований микрокристаллическая, массивная, кубической или короткопризматической формы. При этом и химический, и фазовый составы новообразований соответствуют гидросиликатам, гидроалюминатам и гидроферритам кальция, формирующимся при гидратации минералов портландцемента. Однако волокно легко отделяется от оболочки, следовательно, адгезия этой оболочки к волокну ниже, чем к цементному камню, вследствие чего базальтовое волокно как армирующий компонент, повышающий трещиностойкость, работать не может. Таким образом, для применения дисперсного армирования необходимо обеспечить сохранность базальтового волокна в щелочной среде и улучшить сцепление волокна с цементным камнем.

При анализе существующих способов защиты базальтового волокна от выщелачивания [7–10] установлено,

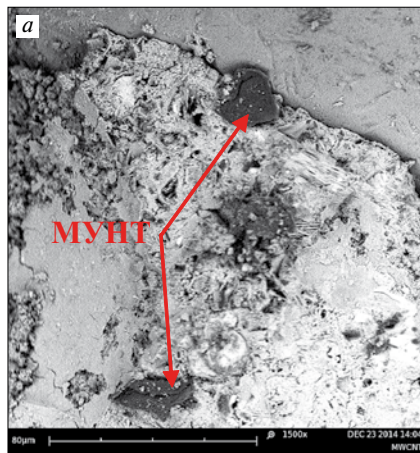


Рис. 2. Структура цементного камня с углеродными нанотрубками (черные включения): а – в зоне граничного слоя между цементным камнем и заполнителем; б – частично гидратированная частица клинкера в окружении гидроксида кальция

Fig. 2. Structuring of cement stone-walled carbon nanotubes (black inclusions): a – in the area of the boundary layer between the cement stone and aggregate, b – partially hydrated particles clinker surrounded by calcium hydroxide

consuming and difficult to perform, their use is, of course, entail a reduction in the production of basalt fiber. Thus, the question of creating an effective way to protect basalt fiber is still open.

The hypothesis of the authors [11] is the possibility of working together to achieve a cement stone and basalt fiber reinforcement by the introduction of the fiber-reinforced concrete mixture dispersion of multi-walled carbon nanotubes. Introduction of a dispersion of carbon nanotubes leads to the structuring of the cement matrix. It forms a dense concrete shell a dense defect-free surface on solids (including cement particles, fillers) that provides a better adhesion on their surface [12].

To verify this hypothesis were carried out investigation of the structure of cement-sand mortar, modified multiwall carbon nanotubes (MWCNT) and basalt fiber. It was assumed that the structuring of the cement matrix after introduction of the dispersion of carbon nanotubes leads to the formation of a dense coating with a thickness of 1 to 5 micron crystalline morphology oriented vertically to the surface of the solid phase.

In the analysis of the microstructure of the cement stone determined that the absence in the composition of sample dispersion of multiwalled carbon nanotubes, hydration of the cement clinker (Fig. 1) is the classical case to form acicular calcium hydrosilicates.

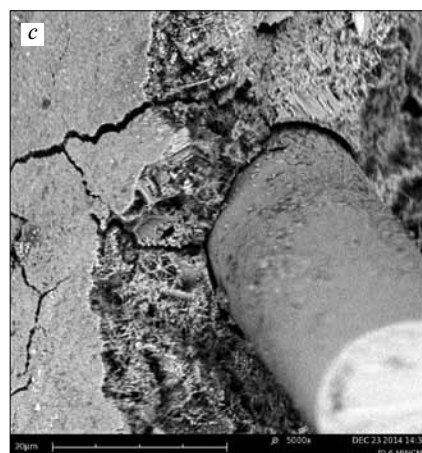
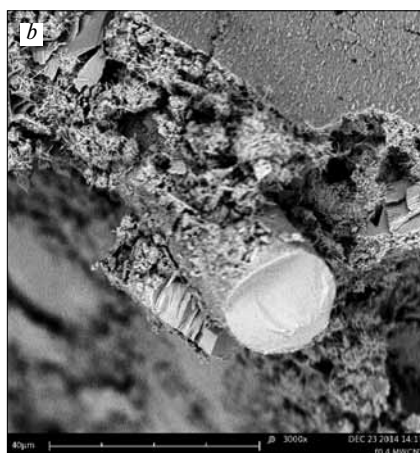
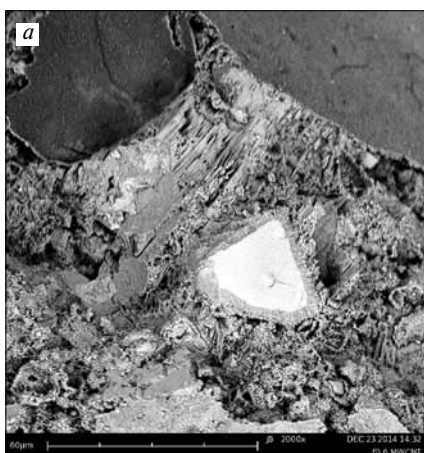
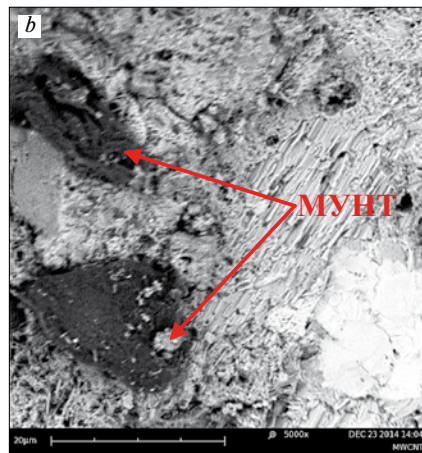


Рис. 3. Микроструктура цементного камня, модифицированного базальтовым волокном и МУНТ: а – состояние граничных слоев; б, с – уплотнение структуры цементного камня по поверхности базальтового волокна

Fig. 3. Microstructure of cement stone are modified of basalt fiber and MWCNT: a – the state of the boundary layer; b, c – seal structure of cement stone on the surface of basalt fiber

что они весьма трудоемки и сложны в исполнении, их применение, несомненно, повлечет за собой снижение технологичности производства базальтового волокна. Таким образом, вопрос создания эффективного способа защиты базальтового волокна до сих пор остается открытым.

Авторами [11] была выдвинута гипотеза о возможности достижения совместной работы цементного камня и армирующего базальтового волокна путем введения в состав фибробетонной смеси дисперсии многослойных углеродных нанотрубок. Введение дисперсии углеродных нанотрубок приводит к структурированию цементной матрицы в плотных бетонах с образованием плотной бездефектной оболочки по поверхности твердых фаз (включая частицы цемента, наполнителей и заполнителя), обеспечивающей лучшее сцепление с их поверхностью [12].

Для проверки выдвинутой гипотезы были проведены исследования структуры цементно-песчаного раствора, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) и базальтовым волокном. Предполагалось, что структурирование цементной матрицы после введения дисперсии углеродных нанотрубок приведет к формированию плотной оболочки толщиной от 1 до 5 мкм с морфологией кристаллогидратов, ориентированных вертикально к поверхности твердой фазы.

При анализе микроструктуры цементного камня установлено, что при отсутствии в составе образца дисперсии многослойных углеродных нанотрубок гидратация цементного теста (рис. 1) идет по классической схеме с формированием игольчатых гидросиликатов кальция.

В ходе изучения структуры образца, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками, обнаружено, что используемая дисперсия недостаточно однородна, на снимках микроструктуры отчетливо видны коагулированные частицы МУНТ (рис. 2).

На представленных снимках микроструктуры модифицированных образцов отмечены скопления гранул МУНТ в контакте с частицами портландцемента. На рис. 2, *b* отчетливо видна частица портландцемента в окружении блоков из пластинок гидроксида кальция, что позволяет говорить об интенсификации выщелачивания цементного клинкера в присутствии углеродных нанотрубок. При этом отмечаются значительно меньшие усадочные трещины как в цементном камне, так, на граничных слоях с поверхностью заполнителя (рис. 2, *a*).

При изучении структуры цементно-песчаных образцов, модифицированных базальтовым волокном и дисперсией многослойных углеродных нанотрубок, установлено, что, несмотря на отсутствие качественной дисперсии МУНТ, вокруг базальтового волокна формируются уплотненные структуры, прежде всего из гидроксида кальция (рис. 3).

Как видно из снимков, в присутствии МУНТ улучшается сцепление как с заполнителем (рис. 3, *a*), так и с

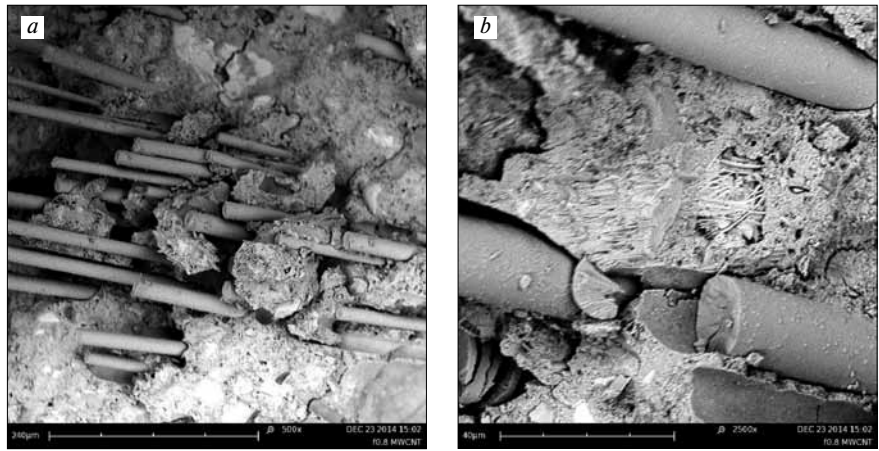


Рис. 4. Микроструктура цементного камня, армированного базальтовым волокном (0,8% от массы цемента) в сочетании с дисперсией МУНТ: *a* – неоднородное распределение волокон; *b* – фрагмент микроструктуры при увеличении $\times 2500$

Fig. 4. The microstructure of cement stone, basalt fiber reinforced (0,8% of cement weight) in combination with MWCNT dispersion: *a* – an inhomogeneous distribution of the fibers; *b* – a fragment of the microstructure at 2500 magnification

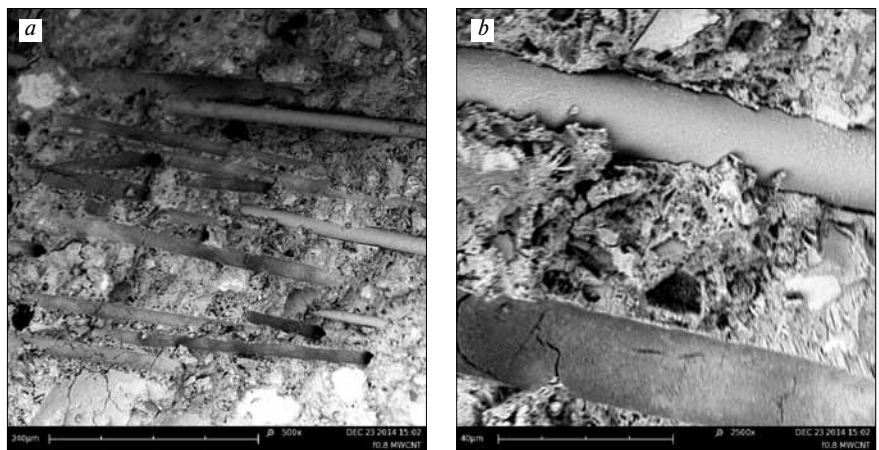


Рис. 5. Микроструктура цементного камня, модифицированного базальтовым волокном и МУНТ: *a* – скол цементного камня со следами от базальтового волокна; *b* – фрагмент микроструктуры при увеличении $\times 2500$

Fig. 5. Microstructure of cement stone are modified of basalt fiber and MWCNT: *a* – chipped of cement stone with traces of basalt fiber; *b* – a fragment of the microstructure at 2500 magnification

In examining the structure of the sample, the modified layered carbon nanotubes, has been found that the used dispersion is not enough homogeneous, in the microstructure images clearly visible coagulated particles of MWCNT (Fig. 2).

The images of the microstructure of the modified samples marked accumulation of MWCNT granules in contact with Portland cement particles. Fig. 2, *b* clearly shows the Portland cement particle surrounded blocks platelets of calcium hydroxide, which allows us to intensify leaching of the cement clinker in the presence of carbon nanotubes. It was noted significantly lower shrinkage cracks in the cement stone and at the boundary layers to the surface of filler (Fig. 2, *a*).

In research the structure of the cement-sand samples modified basalt fiber and multi-walled carbon nanotube dispersion found that despite the lack of good quality MWCNT dispersion around the basalt fiber densified structure are formed, primarily of calcium hydroxide (Fig. 3).

As seen from the images, in the presence of MWCNT improved traction with filler (Fig. 3, *a*) and with basalt fiber the surface (Fig. 3, *b*, *c*), reduced shrinkage cracks, greatly compacted of cement stone structure. The optimum concentration of basalt fibers in cement systems is 0,3–0,4%

поверхностью базальтового волокна (рис. 3, *b, c*), уменьшаются усадочные трещины, существенно уплотняется структура цементного камня.

Оптимальная концентрация базальтовых волокон в представленных системах составляет 0,3–0,4% от массы цемента. При большем содержании армирующего волокна (до 0,8% от массы цемента) наблюдается комкование смеси, волокна неравномерно распределяются по объему цементного камня (рис. 4, *a, b*).

Однако и в случае неравномерного распределения волокон их поверхность покрыта плотными новообразованиями, преимущественно гидроксидом кальция. На рис. 5 представлены характерные снимки следов от поверхности базальтового волокна, показывающие практически полное покрытие поверхности базальтового волокна новообразованиями.

Анализируя снимки микроструктуры модифицированных цементно-песчаных образцов, можно говорить о существенном влиянии дисперсии МУНТ на морфологию новообразований в областях непосредственного контакта МУНТ с формирующимся цементным камнем и базальтовым волокном. Таким образом, решается проблема обеспечения защиты базальтового волокна от выщелачивания в цементном камне за счет структурирования цементного камня по поверхности армирующих базальтовых волокон дисперсией многослойных углеродных нанотрубок.

Список литературы

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М.: АСВ, 2004. 560 с.
2. Алексеева Л.Л. Инновационные технологии и материалы в строительной индустрии. Ангарск: АГТА, 2010. 104 с.
3. Калугин И.Г. Дисперсное армирование ячеистых бетонов базальтовым волокном // *Ползуновский альманах*. 2009. № 3. Том 2. С. 37–39.
4. Bin Wei, Hailin Cao, Shenhua Song Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment // *Materials and Design*. 2010. No. 31, pp. 4244–4250.
5. Гутников С.И. Влияние оксида алюминия на основные свойства базальтовых стекол и волокон на их основе. Дис... канд. техн. наук. Москва. 2009. 127 с.
6. Баталин Б.С., Сарайкина К.А. Исследование процесса взаимодействия стекловолокна с цементным камнем // *Стекло и керамика*. 2014. № 8. С. 37–40.
7. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Семкова Е.Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2012. № 1. С. 185–192.
8. Кнотко А.В., Меледин А.А., Гаршев А.В., Путляев В.И. Модификация поверхностного слоя базальтового волокна для увеличения коррозионной стойкости в фиброцементных композитах // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 89–93.
9. Кнотко А.В., Меледин А.А., Гаршев А.В., Путляев В.И. Процессы при ионообменной обработке поверхности базальтового стекловолокна // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 75–77.
10. Физико-механические основы композиции неорганического вяжущего – стекловолокно / Под ред. Пашченко А.А. Киев: Высшая школа, 1979. 224 с.
11. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И. Структурирование цементного камня по поверхности армирующих базальтовых волокон // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2014. № 2 (24). С. 203–207.
12. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Керен Я., Мачюлайтис Р., Пудов И.А., Полянских И.С., Сенков С.А., Политаева А.И., Гордина А.Ф., Шайбадуллина А.В. Наноструктурирование композитов в строительных материалах: Монография / Под ред. Яковлева Г.И. Ижевск: Изд. ИжГТУ, 2014. 196 с.

by weight of cement. At a higher content of reinforcing fiber (up to 0,8% by weight of cement) observed caking mixture fibers are unevenly distributed over the volume of cement stone (Fig. 4, *a, b*).

However, in the case of an uneven distribution of the fibers, their surface is covered with dense tumors, preferably calcium hydroxide. Fig. 5 shows typical images of traces from the surface of basalt fiber, showing almost complete coverage of the surface of the basalt fiber tumors.

By analyzing images of the microstructure of the modified cement-sand samples, we can talk about a significant influence of the dispersion of MWCNT on the morphology tumors in areas of direct contact MWCNT emerging cement stone and basalt fiber. Thus, we can talk about the possibility of the protection of basalt fiber from leaching into cement stone due to the structuring of cement stone on the surface of basalt fiber by dispersion of multilayer carbon nanotubes.

References

1. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktzii: monografiya [Composites based on fiber concrete. Theory and design, technology, construction: monograph]. Moscow: ASV. 2004. 560 p.
2. Alekseev L.L. Innovatsionnye tekhnologii i materialy v stroitel'noi industrii [Innovative technologies and materials in the construction industry]. Angarsk: AGTA. 2010. 104 p.
3. Kalugin I.G. Dispersed reinforcement of cellular concrete basalt fiber. *Polzunovskii al'manakh*. 2009. No. 3. Vol. 2, pp. 37–39. (In Russian).
4. Bin Wei, Hailin Cao, Shenhua Song Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials and Design*. 2010. No. 31, pp. 4244–4250.
5. Gutnikov S.I. Effect of aluminum oxide on the basic properties of basalt glasses and fibers on their basis. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2009. 127 p.
6. Batalin B.S., Saraykina K.A. The study of the interaction of cement stone with fiberglass. *Steklo i keramika*. 2014. No. 8, pp. 37–40. (In Russian).
7. Saraykina K.A., Semkova E.N., Golubev V.A. Alkali basalt fiber and how to improve. *Vestnik PNIPIU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012. No. 1, pp. 185–192. (In Russian).
8. Knotko A.V., Meledin A.A., Garshev A.V., Putlyaev V.I. Modification of surface layer of basalt fibre for improvement of corrosion resistance in fibre-cement composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 9. pp. 89–93. (In Russian).
9. Knotko A.V., Meledin A.A., Garshev A.V., Putlyaev V.I. The process of ion exchange at the surface treatment of basaltic glass. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 9, pp. 75–77. (In Russian).
10. Fiziko-mekhanicheskie osnovy kompozitsii neorganicheskoe vyazhushchee – steklovolokno [Physical and mechanical basics of composition of inorganic binders–fiberglass]. Ed. Pashchenko A.A. Kiev: Vysshaya shkola. 1979. 224 p.
11. Saraykina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I. Structuring of cement stone on the surface of the reinforcing fibers of basalt. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2014. No. 2 (24), pp. 203–207. (In Russian).
12. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Keren Ya., Machulaytis R., Pudov I.A., Polyanskikh I.S., Senkov S.A., Politaeva A.I., Gordin A.F., Shaybadullina A.V. Nanostrukturirovanie kompozitov v stroitel'nykh materialakh: monografiya [Nanostructuring of composites in construction materials: monography]. Ed. Yakovlev G.I. Izhevsk: IzhSTU. 2014. 196 p.