

УДК 666.94:691.3

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ СИСТЕМЫ,  
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЕ БАЗАЛЬТОВЫМ ФИБРОВЛОКНОМ****К.Ю. БЕЛОМЕСОВА***(Брестский государственный технический университет)*

Демонстрируются результаты экспериментально-теоретических исследований дисперсного армирования как наиболее эффективного способа получения цементных композитов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Проведена сравнительная характеристика технических показателей наиболее распространенных видов армирующих волокон, с успехом применяемых в современном строительстве, а также базальтового волокна. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено преимущество последнего, заключающееся в его уникальных свойствах. Показано, что применение базальтовой фибры совместно с напрягающим цементом позволяет добиться не только роста прочностных характеристик цементных композитов, но также ведет к повышению их непроницаемости.

**Ключевые слова:** *напрягающий цемент, метакаолин, гипс, базальтовое фиброволокно, гидратация.*

**Введение.** Дисперсное армирование цементных композитов разного рода волокнами-фибрами – один из наиболее оптимальных способов получения высокофункциональных и высококачественных строительных материалов с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. В качестве материалов для дисперсного армирования выступают различные виды металлических и неметаллических волокон минерального и органического происхождения, наиболее известными из которых являются: стальные, стеклянные, базальтовые, полипропиленовые и т.п.

Высокодисперсные волокнистые наполнители, применяемые в качестве армирующих компонентов, позволяют устранить основные недостатки традиционных бетонов – низкую прочность на растяжение и вязкость разрушения (трещиностойкость). В целом, среди множества материалов, применяемых для дисперсного армирования бетонов, на основании существующих, а также собственных исследований в данной области [1, с. 75] необходимо отдельно выделить *базальтовые волокна*.

Перспективность их использования объясняется многими факторами, главные из которых в большей степени основаны на природе самого волокна: базальтовое волокно является продуктом тепловой обработки горной породы типа базальт, обладающим высокими прочностными и физико-механическими характеристиками, свойственными исходной породе. Базальтовые волокна делятся на две большие группы: непрерывные (толщина элементарного волокна от 7 до 26 мкм) и дискретные волокна (толщина около 3...9 мкм), имеющие существенные различия, начиная от способа производства и заканчивая областью применения. Особый интерес при выборе армирующего компонента бетонных композитов вызывает разновидность непрерывного базальтового волокна – рубленое волокно (далее фиброволокно), получаемое методом производственной рубки из ровинга отрезков заданной длины, состоящих из множества параллельно уложенных элементарных волокон, собранных замасливателем во временные пучки (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Базальтовое фиброволокно в естественном состоянии (а)  
в цементно-песчаной смеси (б)**

При соединении базальтовых фиброволокон с компонентами смеси в процессе перемешивания временные пучки распадаются на отдельные монофиламенты (рисунок 1, б), которые, в свою очередь, свободно и хаотично распределяются во всем объеме композита, вызывая так называемый эффект 3D-армирования. Таким образом, в цементном композите формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая, в свою очередь, эффективно противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при внешних силовых воздействиях. Вместе с тем необходимо отметить, что базальтовое фиброволокно имеет множество преимуществ перед другими армирующими волокнами (стальными, стеклянными, полипропиленовыми и т.п.), успешно применяемыми в современном строительстве (таблица 1).

Таблица 1. – Сравнительная характеристика различной фибры для бетона согласно [2]

Материал	Базальтовое фиброволокно	Полипропиленовая фибра	Стекловолокно марки E или S	Стальная фибра
Прочность на растяжение, МПа	<b>1900...3900</b>	150...600	1500...3500	600...1500
Модуль упругости, ГПа	<b>90...130</b>	35	75	190
Коэффициент удлинения, %	<b>3,2</b>	20...150	4,5	3...4
Температура плавления, °С	<b>1450</b>	160	860	1550
Плотность, г/см <sup>3</sup>	<b>2,60</b>	0,91	2,60	7,80

Преимущества данного вида волокон выражаются в уникальных свойствах базальтовых волокон, таких как: высокий уровень физико-механических и химических свойств; повышенная стойкость в агрессивных средах; долговечность; стабильность свойств при длительной эксплуатации в различных условиях; хорошая адгезия к различным связующим. Также базальтовые волокна обладают высокими конструктивными, теплозвукоизоляционными, диэлектрическими и другими свойствами, позволяющими широко использовать их в различных отраслях промышленности.

Однако, что касается дисперсного армирования цементных композитов базальтовым волокном, то у ученых нет единого мнения относительно способности данного волокна противостоять воздействиям среды гидратирующих цементов, являющейся агрессивной по отношению ко всем видам волокон, особенно минеральным. В настоящее время это является проблемой.

На современном этапе развития в области строительных материалов существует целый ряд исследований отечественных и зарубежных ученых, подтверждающих перспективность использования базальтового волокна для дисперсного армирования бетонов [2–4], но вместе с тем известны исследовательские работы, ставящие под сомнение способность базальтового волокна сопротивляться щелочным средам цементных систем [5].

Противоречивость результатов исследований связана со многими факторами, особенно с использованием различных методик при изучении данного вопроса, отличием в химических составах базальтовых волокон и т.п. Однако даже в условиях противоречивости данных о стойкости базальтовых волокон в цементных системах сегодня разрабатываются различные способы и методы защиты данных волокон от разрушения в щелочной среде.

По мнению авторов [2–5], один из эффективных способов защиты базальтового волокна в среде гидратирующих цементов – снижение щелочности (рН) данной среды, что может быть достигнуто как минимум двумя способами: 1) введением добавок различной природы и дисперсности; 2) выбором оптимального типа цемента. Из всех известных способов понижения щелочности среды гидратирующих цементов на сегодняшний момент наиболее широко применяемым является введение активной минеральной добавки – микрокремнезёма.

На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, авторами [3–5] установлено, что введение в цементную систему микрокремнезема (в количестве 10%) приводит к значительному снижению рН среды (со значений  $\approx 12,3$  до значений  $\approx 11,96$ ). В свою очередь, это, по их мнению, ведет к созданию благоприятных условий для лучшей сохраняемости базальтового волокна. При этом необходимо понимать, что щелочная среда, свойственная бетону, вызванная присутствием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и характеризуемая показателями концентрации ионов водорода рН, достигающими значений 12...13, служит главным образом защитой стальной арматуры железобетона от коррозии. Многочисленными исследованиями доказано, что сталь подвержена коррозии уже при значениях рН от 5 до 10, однако при значениях рН, достигающих 10 и более, скорость коррозии быстро падает, а при значении рН около 14 она практически отсутствует. Таким образом, чем выше щелочность среды, тем выше ее защитные свойства по отношению к стальной арматуре.

Исходя из вышесказанного, встает вопрос о необходимости и целесообразности снижения уровня pH среды гидратирующего цемента. Что касается железобетона, то здесь ответ очевиден: снижая щелочность бетона за счет введения микрокремнезема, мы сознательно создаем «благоприятные» условия для протекания процессов коррозии стальной арматуры, тем самым понижаем важнейшие характеристики, а именно прочность и долговечность конструкций из железобетона. Что касается введения микрокремнезема и, как следствие, снижения pH среды гидратирующих цементов по отношению к базальтовому волокну, то здесь также нет однозначного ответа. По мнению большинства исследователей, базальтовая фибра, являясь по своей природе продуктом обработки горной породы типа базальт, обладает высокими прочностными, физико-механическими характеристиками, а также повышенной стойкостью в агрессивных средах.

Таким образом, применение в качестве дисперсного армирования базальтового волокна выступает как эффективный способ повышения важнейших характеристик цементных бетонов.

Однако фиброармированные бетоны, несмотря на ряд преимуществ перед традиционными, обладают некоторыми недостатками, хотя и в меньшей степени, чем последние. Основным недостатком фиброармированных бетонов, по-прежнему остается наличие усадочных деформаций, развивающихся как во время гидратации цемента (наиболее активно), так и в процессе эксплуатации конструкции. В свою очередь, развитие усадочных деформаций, в частности аутогенной усадки, приводит к микротрещинообразованию композита и, как следствие, к потере несущей способности всей конструкции.

Один из возможных способов решения указанной проблемы – применение специальных вяжущих, в которых часть цемента заменяется композицией на основе алюминатных и сульфатсодержащих материалов. Такие цементы принято называть напрягающими, их расширение происходит в результате взаимодействия алюмо- и сульфатсодержащих фаз с повышенным образованием этtringита ( $C_3A\bar{S}_3H_{32}$ ) [6, с. 102]. В качестве алюмосодержащего компонента представлен метакаолин (МТК), а в качестве сульфатного компонента – двуводный гипс  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (гипсовый камень) как наиболее стабильный сульфатсодержащий продукт.

**Экспериментальные исследования и их анализ.** На основании вышеизложенного в целях изучения вопроса влияния напрягающего цемента, состоящего из портландцемента и расширяющейся добавки, представленной метакаолином и гипсом, на стойкость базальтового волокна в данной цементной среде проведен ряд экспериментальных исследований. Основным из исследований было определение pH среды гидратирующего напрягающего цемента. Для проведения постановочных исследований, касающихся определения концентрации ионов водорода pH, получены водные вытяжки цементного камня в соответствии с методикой, подробно описанной в СТБ 1168 [7].

В качестве контрольных образцов были заформованы образцы-кубы с длиной ребра 20 мм, всего заформовано четыре контрольных серии. Определение значений концентрации ионов водорода pH проводили на стационарном pH-метре «pH-211» производства HANNA Instruments.

Результаты исследования влияния компонентов напрягающего цемента на изменение pH цементной среды представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Изменение pH водной вытяжки цементной системы

Наименование серии	Состав	Значение pH среды	Температура исследуемой вытяжки, °С
Серия А	ПЦ	12,66	17,4
Серия А'	ПЦ + БФ (5%)	12,68	17,6
Серия В	НЦ	12,66	17,6
Серия В'	НЦ + БФ (5%)	12,68	17,7

ПЦ – портландцемент; НЦ – напрягающий цемент; БФ – базальтовое фиброволокно (в количестве 5% от массы вяжущего).

Из полученных данных следует, что напрягающий цемент, применяемый в качестве вяжущего вещества, практически не оказывает влияния на значения концентрации ионов водорода pH цементной среды, следовательно, среда гидратирующего напрягающего цемента по-прежнему остается щелочной, другими словами, агрессивной для минеральных волокон, по мнению некоторых авторов [5].

Однако то, что базальтовое волокно в среде гидратирующих цементов теряет свои прочностные и физико-механические характеристики, с большой уверенностью сказать нельзя, так как работы авторов [2–4], напротив, доказывают высокий уровень стойкости базальтового волокна в щелочной среде. Также необходимо отметить, что степень влияния щелочной среды на основные характеристики базальтового волокна во многом зависит от вида базальтового волокна (дискретное или непрерывное). Связано это в большей степени с поверхностью волокна. Дискретное волокно обладает развитой поверхностью и наличием нежелательных дефектов (пор и микротрещин) на поверхности самого волокна,

что способствует быстрому протеканию процессов адсорбции агрессивной среды и в результате ведет к снижению прочности волокна в целом, а в некоторых случаях даже к разрушению. При этом непрерывное волокно характеризуется более гладкой поверхностью, что видно на микрофотоснимке комплексной нити базальтового фиброволокна (рисунок 2), в меньшей степени обладающей наличием таких дефектов, как поры и микротрещины.

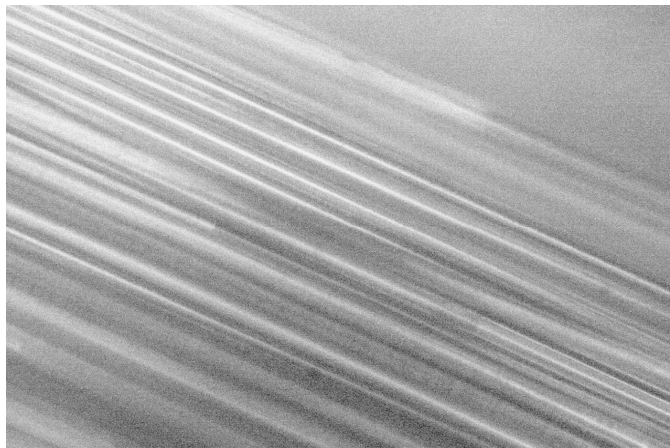


Рисунок 2. – Микроснимок комплексной нити (фиброволокно)

Что касается влияния базальтового волокна на прочностные характеристики цементных композитов, то значения прочности на растяжение при изгибе образцов серии В (без армирования) в возрасте 28 суток примерно на 50% меньше значения прочности образцов серии В' (армированных базальтовой фиброй). Следовательно, введение в смесь базальтовых волокон способствует увеличению прочности цементного композита за счет высокого сцепления волокна с модифицированной цементной матрицей и создания эффекта объемного микроармирования (3D-армирования). Также необходимо отметить, что при введении базальтовой фибры увеличивается вязкость смеси, что обусловлено расщеплением одного базальтового фиброволокна на множество мельчайших монофиламентов, которые обволакивают все компоненты смеси и образуют единую пластично-вязкую систему. Благодаря такому хаотичному расположению монофиламентов в цементной системе формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая, в свою очередь, эффективно противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при внешних силовых воздействиях.

Таким образом, анализ выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать следующие **выводы**:

- 1) комплекс проведенных исследований стойкости базальтовых волокон в водной вытяжке цементного камня, включающий микроскопический анализ и прямые испытания, свидетельствует о незначительном влиянии щелочной среды гидратирующего цемента, а именно напрягающего цемента на прочностные характеристики базальтового фиброволокна;
- 2) введение параллельно с расширяющимися компонентами напрягающего цемента базальтового фиброволокна позволяет не только предотвратить нежелательные усадочные деформации, но и создать совместное с расширяющейся цементной системой 3D-армирование, что собственно и приводит к получению композитов с высокими эксплуатационными характеристиками;
- 3) введение в состав цементных композитов базальтового фиброволокна позволяет увеличить показатели прочности как на ранних, так и на поздних стадиях твердения;
- 4) в свою очередь, получить четкие закономерности протекания процессов гидратации и формирования фазового состава цементного камня в присутствии активных минеральных добавок (микркремнезем, метакаолин и т.п.) не представляется возможным, поскольку система таких пуццоланов довольно сложная, формирование соединений в большей степени определяется условиями протекания гидратации, а также качеством исходного сырья и технологией изготовления данных минеральных добавок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беломесова, К.Ю. Применение базальтовой фибры в качестве армирующего компонента в цементно-песчаных композитах / К.Ю. Беломесова // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 74–77.

2. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф.Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.
3. Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.В. Боровских ; Казан. гос. архитектурно-строительный ун-т. – Казань, 2009. – 168 с.
4. Деревянко, В.Н. Стойкость базальтового волокна в различных средах / В.Н. Деревянко // Вісник ПДАБА : до 80-річчя Придніпр. держ. акад. будівн. та архіт. – 2010. – № 2. – С. 1–6.
5. Бабаев, В.Б. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе / В.Б. Бабаев // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.
6. Павлова, И.П. Исследование влияния расширяющихся сульфоферритных и сульфоалюминатных добавок на прочностные показатели и собственные деформации цементных систем / И.П. Павлова, Т.В. Каленюк, К.Ю. Беломесова // Вестн. БрГТУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 1. – С. 123–127.
7. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона : СТБ 1168-99. – Введ. 21.07.1999. – Минск : Минстройархитектуры, 1999. – 20 с.

Поступила 21.12.2018

### HIGHLY EFFICIENT BASALT FIBER-REINFORCED COMPOSITE SYSTEMS

**K. BELAMESAVA**

*In present paper are presented experimental-theoretical researches of fiber reinforcing such as more effective method for high physical-mechanical and exploitation properties cement composite acceptance. Comparative characteristics of technical properties for more prevailing reinforced fiber which are successful applied in building, including basalt fiber, are carry out. Theoretical validated and experimental affirmed basalt fiber advantage, involving in uncial properties such as high level physical-mechanical and chemical characteristics, durability and so on. Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to three-dimension micro reinforced cement matrix formation, which are effective counteracted to compressive and tensile stresses, taking place in concrete on external force interactions. Basalt fiber insertion in expansive cementitious systems lead to partial restriction composite self strains and due to high adhesion with modified cement matrix tensile strength are increased. Applying of basalt fiber jointly with self-stressing cement allow to avoid not just only cement composite strength properties, but also increasing impermeability.*

**Keywords:** self-stressing cement, metakaolin, gypsum, basalt fiber, cement hydration process.