

УДК 691.328.43:691.544

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-81-88

**СТОЙКОСТЬ БАЗАЛЬТОВОГО ФИБРОВОЛОКНА В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ
ГИДРАТИРУЮЩИХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ***канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1996-2678>**К.Ю. БЕЛОМЕСОВА**(Брестский государственный технический университет)**ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4738-4585>*

В статье представлены исследования, направленные на обоснование возможности применения базальтовой фибры в качестве дисперсного армирования в цементных системах на основе расширяющихся вяжущих с высокой энергией расширения (напрягающих цементов). Исследована щелочестойкость базальтовой фибры по ускоренной методике путем четырехчасовой выдержки в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при температуре $t=95^\circ\text{C}$, позволяющей смитировать процесс эксплуатации в течение 10 лет в среде цементного камня. Прочность на растяжение при изгибе цементных образцов с базальтовой фиброй, подвергнутой обработке по ускоренной методике, предложена как один из критериев оценки качества щелочестойкости фибры. Применение НЦ на основе портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из смеси высокоактивного метакеолина и природного гипса, позволяющего снизить рН среды со значений $\approx 12,13$ до значений $\approx 11,25$, является альтернативным способом снижения щелочности гидратирующей среды как наиболее благоприятной для нахождения базальтового волокна. Проведен ряд экспериментальных исследований по определению прочностных показателей и собственных деформаций армированного базальтовым волокном напрягающего цемента. В ходе экспериментально-теоретических исследований выявлено, что базальтовое волокно обладает высокой щелочестойкостью. Введение базальтовой фибры в количестве 5% от массы вяжущего позволяет повысить прочность на сжатие НЦ на 35%, прочность на растяжение при изгибе на 68%, при этом собственные деформации соответствуют 0,22% свободного расширения и 2,74 МПа самонапряжения.

Ключевые слова: *напрягающий цемент, дисперсное армирование, базальтовое волокно, щелочестойкость, прочность на растяжение при изгибе, прочность на сжатие, собственные деформации.*

Введение. Высококачественные бетоны (англ. High-Performance Concrete – HPC), находящиеся на пике популярности в строительной отрасли, обладая рядом неоспоримых достоинств, в числе которых высокая прочность на сжатие, по-прежнему имеют низкую прочность при воздействии растягивающих усилий. Кроме того, таким бетонам свойственно хрупкое разрушение (практически полное отсутствие нисходящей ветви на диаграмме деформирования), а также повышенные значения деформаций усадки (главным образом, аутогенной), что обусловлено повышенным расходом цементной составляющей в силу специфики технологии получения данных бетонов [1]. Развивающиеся усадочные деформации впоследствии приводят к микротрещинообразованию композита и, как следствие, к снижению его эксплуатационных характеристик. Компенсировать негативные усадочные напряжения, а в ряде случаев создать деформации расширения возможно благодаря применению в качестве вяжущего цементных композитов расширяющегося цемента (напрягающего цемента). При этом, расширяющиеся вяжущие, направленные на борьбу с усадочными явлениями, зачастую не только не оказывают влияния на повышение прочностных показателей цементных композитов, а напротив, в случае применения расширяющихся цементов с высокой энергией расширения в силу специфики механизма расширения могут привести к некоторому разуплотнению структуры, что выражается спадами прочности. Для нивелирования эффекта разуплотнения из-за активного расширения в таких системах, особенно на ранних стадиях твердения, следует применять дисперсное армирование [2].

Модифицирование структуры цементных композитов волокнами различного рода позволяет получить композит с улучшенными характеристиками: высоким показателем сопротивления растягивающим и изгибающим нагрузкам, повышенной трещиностойкостью, сопротивлением усадочным деформациям (за счет создания пространственного каркаса и высокого сцепления волокна с цементной матрицей), повышенной водонепроницаемостью и морозостойкостью. Эффективность применения волокон определяется как свойствами: прочностью на растяжение, размерами волокна, стойкостью к щелочам, коррозионной стойкостью и плотностью, так и содержанием в композите. Наиболее распространенными и получившими практическое применение в строительной отрасли являются стальные, полипропиленовые и базальтовые волокна [4]. По ряду причин использование дисперсного армирования в массовом строительстве ограничено, в т.ч. из-за невысокой адгезии к цементному камню, недостаточной коррозионной стойкости и стойкости в щелочной среде гидратирующего цемента, стоимости, отсутствия нормативной базы и пр. [4; 5].

Базальтовое волокно может быть выделено как один из наиболее эффективных видов волокна, применяемого для модифицирования цементных композитов. Связано это, в первую очередь, с его природными свойствами, высокими прочностными показателями, а также высокой адгезией к цементному камню [4]. При этом, вопрос стойкости и в целом влияния на базальтовое волокно агрессивных сред, а именно щелочной среды гидратирующего цемента, до сих пор не имеет однозначного ответа, чем и вызывает ряд сомнений и, как следствие, отказ от применения

данного волокна в качестве армирующего компонента цементных систем. Неоднозначность полученных результатов исследований различных авторов связана с рядом факторов, в числе которых отсутствие единой методики при изучении данного вопроса, использование различного по химическому составу базальтового волокна, ограниченность во времени при проведении экспериментальных исследований и т.п.

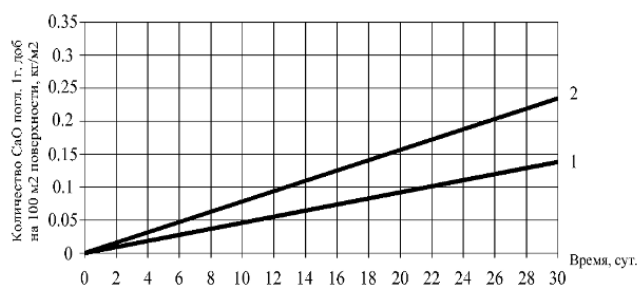
Так, ранее проведенные С.Ф. Канаевым [3] исследования показали, что стойкость базальтового волокна и базальтопластиковой арматуры превосходит аналоги из стекловолокна.

Исследования стойкости минеральных волокон в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ группой ученых во главе с Ф.Н. Рабиновичем говорят о достаточно высокой степени разрушения минерального волокна в агрессивной среде. К примеру, алюмоборсиликатное моноволокно, выдержанное в течение 12 месяцев в насыщенном растворе извести, потеряло по их данным 72% своей исходной прочности. Однако исследователи отмечают довольно высокую стойкость базальтового волокна, прочность которого после выдержки в аналогичных условиях уменьшилась лишь на 26–32% [4]. Авторы также отмечают тенденцию к затуханию процессов реакции базальтовых волокон с CaO во времени. Наиболее интенсивно процессы выщелачивания наблюдаются в течение первых трех месяцев.

Группа авторов во главе с А.А. Пащенко в своих работах, также посвященных исследованиям стойкости минеральных волокон, утверждает о более высокой стойкости базальтовых волокон в агрессивных средах цементного камня и насыщенного раствора извести. Так, к примеру, после трехлетних испытаний базальтового волокна прочность его уменьшилась лишь на 12–15% [5].

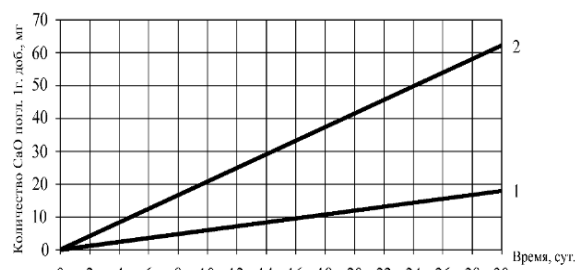
Оценка химической стойкости базальтового волокна производилась при кипячении в этом растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в течение 4 часов [6].

Результаты исследования по поглощению CaO представлены на рисунках 1 и 2.



1 – непрерывное базальтовое волокно;
2 – базальтовая порода

Рисунок 1. – Активность базальтового волокна по отношению к CaO [6]



1 – непрерывное БВ 2800 $\text{cm}^2/\text{г}$;
2 – базальтовая порода 3500 $\text{cm}^2/\text{г}$

Рисунок 2. – Активность базальтовых волокон по отношению к CaO , отнесенная к 100 м^2 поверхности [6]

Как видно из рисунка 1, наибольшей активностью по отношению к CaO обладает базальтовая порода, несмотря на то, что удельная поверхность порошка, полученного из базальтовой породы, составляет $8_{\text{уд}} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$. Это говорит о большей реакционной способности базальта по отношению к CaO в сравнении с кварцевым песком. Данный факт подтверждается и при пересчете поглощения CaO на 100 м^2 поверхности добавки. Поглощение CaO из насыщенного раствора извести базальтовым волокном составляет $0,18 \text{ кг}/\text{м}^2$, что говорит о его химическом взаимодействии с продуктами гидратации портландцемента.

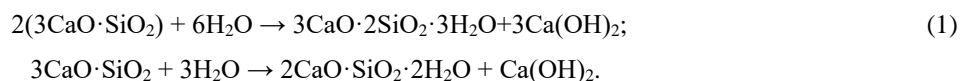
Таким образом, подтверждается, что базальтового волокно вступает в реакцию с продуктами гидратации портландцемента. Однако реакция протекает весьма ограниченно.

В.Б. Бабаевым [7] говорится о достаточно высокой степени разрушения, а в некоторых случаях вообще о практически полном растворении базальтовых волокон в щелочной среде цементных бетонов. При этом, напротив, группа исследователей во главе с И.В. Боровских¹ в своей работе отмечают незначительную потерю прочности волокна, находящегося в щелочной среде гидратирующего цемента и более того, дают заключение о том, что потеря прочности настолько мала, что никоим образом не влияет на прочность всего фиброармированного композита.

Необходимо отметить и тот факт, что в большем числе работ, посвященных исследованиям стойкости волокон, предложено оценивать эту характеристику по потере массы после обработки их в различных средах (щелочных, кислых и др.) при нагревании в течение определенного времени. Однако для волокна как конструкционного материала изменение массы является недостаточно информативной характеристикой его стойкости. Вследствие этого в качестве основного критерия оценки стойкости волокна в агрессивных средах предложено рассматривать косвенную характеристику – прочность при растяжении [8].

Как было отмечено ранее, вопрос стойкости базальтовых волокон возникает у исследователей при выборе того или иного вида волокна в качестве модифицирующего компонента именно цементных систем. Это напрямую связано со средой твердения данных систем, имеющей щелочной характер. В процессе твердения портландцемента в результате реакций гидролиза и гидратации клинкерных минералов жидкая фаза обогащается гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, обретая при этом значение концентрации ионов водорода (рН), находящееся в пределах от 12,5 до 13,5. Базовые реакции гидратации представлены в формуле (1).

¹ Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.В. Боровских. – Казань, 2009. – 168 л.



В итоге перед исследователями возникает задача, направленная на создание более благоприятных условий для нахождения базальтового волокна в цементных системах. Одним из эффективных вариантов решения данной задачи, по мнению большинства авторов² [7], является снижение щелочности среды (рН), в которой будет находиться базальтовое волокно. Достичь этого возможно как минимум двумя способами: введением добавок различной природы и дисперсности; выбором оптимального типа цемента.

Из всех известных способов понижения щелочности среды гидратирующих цементов на сегодняшний момент наиболее популярным является введение активной минеральной добавки – микрокремнезёма. На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, авторами³ [7] установлено, что введение в цементную систему микрокремнезёма (в количестве 10%) приводит к снижению рН среды (со значений $\approx 12,3$ до значений $\approx 11,96$), что в свою очередь, по их мнению, ведет к созданию благоприятных условий для лучшей сохраняемости базальтового волокна.

В данной работе предложен альтернативный способ снижения щелочности гидратирующей среды с созданием более благоприятной среды для нахождения базальтового волокна, заключающийся в применении напрягающего цемента, представляющего собой композицию портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из смеси высокоактивного метакрилолина и природного гипса, что в свою очередь позволяет снизить рН среды со значений $\approx 12,13$ до значений $\approx 11,25$.

Экспериментальные исследования. Сырьевые компоненты. В качестве армирующего компонента напрягающего цемента использовали базальтовое волокно производства ООО «Каменный Век» (Россия, Московская область). Химический состав применяемого волокна, а также основные характеристики представлены в таблицах 1 и 2.

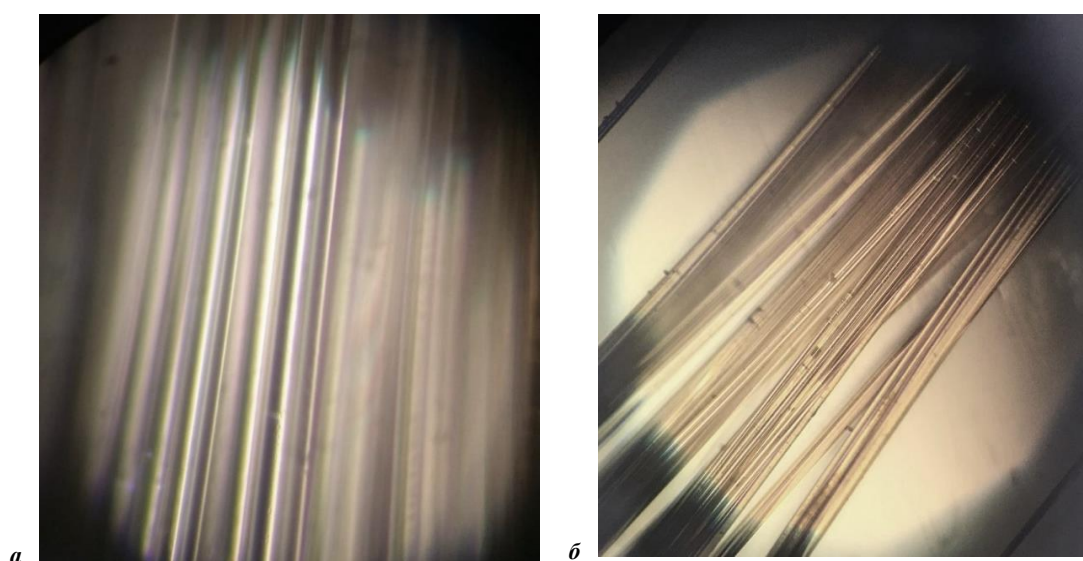
Таблица 1. – Химический состав базальтового волокна

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, % по массе									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	SO ₃	ппп
Базальт	48,1	15,9	8,8	5,3	3,7	1,7	3,4	6,7	0,2	–

Таблица 2. – Характеристики базальтового волокна

Параметр	Ед. изм.	Значение
Диаметр монофиламента (отдельного волокна)	мкм	16
Длина волокна	мм	25,4
Плотность волокна	г/см ³	2,8
Температура плавления	°С	1450

На рисунке 3 представлена микрофотография базальтового волокна, сделанная при помощи цифрового комплекса «Альтами МЕТ 3С».



a – ув. 60х; *б* – ув. 20х

Рисунок 3. – Микрофотография базальтового волокна

² См. сноску 1.

³ См. сноску 1.

На основании существующих многочисленных данных⁴ [3–7] и результатов собственных исследований была принята дозировка базальтового волокна в количестве 5% от массы вяжущего.

Для экспериментальных исследований был использован состав напрягающего цемента, состоящий из портландцемента и сульфатоалюминатной расширяющейся добавки (РД). В качестве алюминатной составляющей РД, содержащей в своем составе от 40 до 50% оксида алюминия, был выбран высокоактивный метакаолин (ВМК). В качестве сульфатного компонента РД использован двуводный гипс (Г). Характеристики используемых материалов представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3. – Химический состав цемента

Вид цемента	Содержание оксидов, %						
	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CaO св.
ЦЕМ I 42,5 Н	5,03	0,37	22,40	1,57	68,41	0,96	1,08

Таблица 4. – Химический состав метакаолина

Содержание основных оксидов метакаолина, в % по массе							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
54±0,05	43±0,05	0,6±0,05	следы	0,5±0,05	0,9±0,05	0,4±0,05	0,1±0,05

Таблица 5. – Химический состав гипса

Содержание основных оксидов гипса, в % по массе		
CaO	SO ₃	H ₂ O
32,57±0,05	46,50±0,05	20,93±0,05

Для определения степени влияния щелочных сред на прочностные характеристики волокна, а именно на его прочность при растяжении, в работе предложено использовать косвенную характеристику – прочность на растяжение при изгибе дисперсно-армированного базальтовым волокном цементного камня. Для моделирования длительного пребывания волокна в щелочной среде вяжущего, базальтовое волокно было подвергнуто предварительной выдержке в течение 4-х часов при температуре $t = 95^{\circ}\text{C}$ в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\text{pH} = 12,58$), что эквивалентно 10 годам нахождения волокна в цементном композите согласно [5].

Для определения стойкости базальтового волокна в среде гидратирующего цемента по плану эксперимента, базальтовое волокно подвергли кипячению (при $t = 95^{\circ}\text{C}$) в течение 4-х часов в следующих модельных средах: насыщенный раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\text{pH} = 12,58$); дистиллированная вода ($\text{pH} = 6,32$). Определение значений концентрации ионов водорода (pH) модельных сред проводили на стационарном pH -метре « $\text{pH}-211$ » производства HANNA Instruments. В целях исключения влияния термохимической обработки на прочность волокон замасливатели с их поверхности не удаляли.

В качестве контрольных образцов были заформованы образцы-призмы размерами $40 \times 40 \times 160$ мм. Процент армирования образцов базальтовым волокном составил 5% по массе вяжущего. Для всех составов водовязущее отношение принято постоянным и равным $\text{В/Вяз} = 0,35$. В состав всех серий входила пластифицирующая добавка I группы на основе эфиров поликарбоксилатов.

Всего были заформованы три опытные серии:

- Напрягающий цемент (НЦ) с добавлением базальтового волокна, не подверженного кипячению (контрольная серия);
- НЦ с добавлением базальтового волокна, подверженного кипячению (при $t = 95^{\circ}\text{C}$) в течение 4-х часов в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- НЦ с добавлением базальтового волокна, подверженного кипячению (при $t = 95^{\circ}\text{C}$) в течение 4-х часов в дистиллированной воде.

После формования опытные образцы выдерживались в течение 28 суток в нормально-влажностных условиях в соответствии с ГОСТ 310.4⁵, СТБ 1335⁶. Для определения прочности на растяжение при изгибе использовали гидравлический пресс CONTROLS AUTOMAX. Испытания опытных образцов проводили в возрасте 28 суток.

Результаты экспериментальных исследований. Средние значения прочности исследуемых образцов всех серий (А, Б, В), полученные в результате испытаний на растяжение при изгибе, приведены на диаграмме (рисунок 4).

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что прочность образцов серий А (контрольная) и Б имеет равное значение и составляет 10,0 МПа, а значение прочности серии В лишь на 4% уступает значению этих серий (А, Б).

Как отмечалось ранее, значение прочности на растяжение при изгибе образцов, армированных базальтовым волокном, подверженным кипячению в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$, было предложено рассматривать в качестве косвенной характеристики значения прочности при растяжении базальтового волокна как армирующего компонента цементных систем.

⁴ См. сноску 1.

⁵ Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии : СТБ 310.4-81. – Введ. 01.07.83. – М. : Госстандарт Союза ССР, 1983. – 16 с.

⁶ Цемент напрягающий. Технические условия : СТБ 1335-2002. – Введ. 01.01.03. – Минск : Минстройархитектуры, 2002. – 11 с.

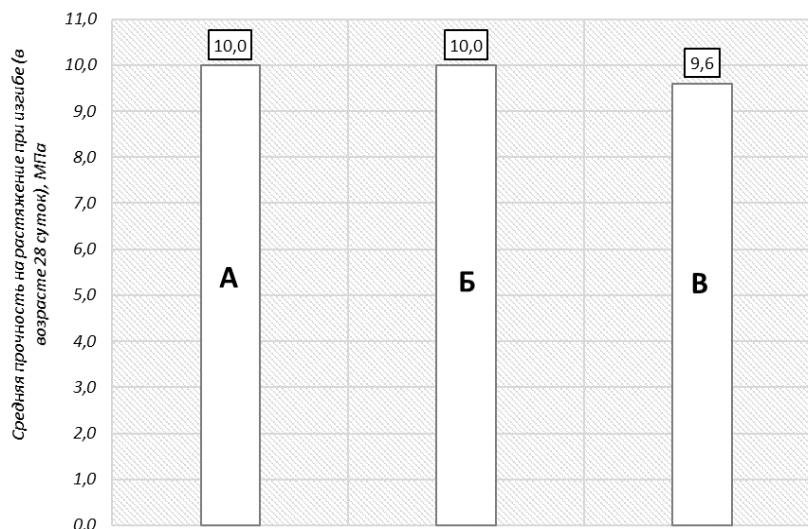


Рисунок 4. – Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток образцов серий А, Б и В

Исходя из полученных данных (см. рисунок 4) можно сделать следующее заключение, что базальтовое волокно обладает высокой степенью стойкости к воздействию щелочной среды ($\text{pH} \approx 11,25\text{--}12,58$) гидратирующего цемента и нахождение данного волокна в такого рода средах не влияет на его прочностные характеристики, а именно не снижает его прочность на растяжение.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что степень влияния щелочной среды на основные характеристики базальтового волокна во многом зависит от его вида (дискретное или непрерывное волокно). Связано это в том числе и с исходным качеством поверхности применяемого волокна, например, дискретное обладает более развитой поверхностью и наличием на ней нежелательных дефектов, таких как поры и микротрещины, что в свою очередь способствует быстрому протеканию процессов адсорбции агрессивной среды (щелочной, кислой и др.) и, как следствие, может привести к снижению прочности волокна в целом, а в некоторых случаях даже к его разрушению [5]. При этом, как было отмечено ранее, непрерывное волокно, используемое в данных исследованиях, обладает гладкой поверхностью, лишенной таких дефектов как микротрещины, поры, что хорошо заметно на микрофотографии данного волокна (см. рисунок 3).

В дополнение к проведенным исследованиям по определению прочности волокна и подтверждению вывода о стойкости базальтового волокна в щелочных средах были сделаны микрофотографии волокна, подверженного кипячению в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рисунок 5).

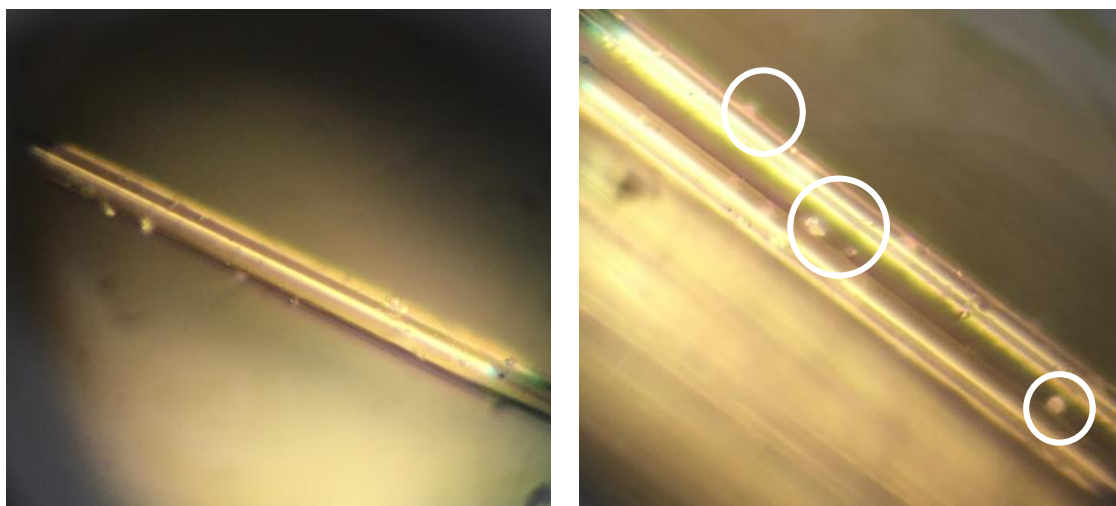


Рисунок 5. – Микрофотография базальтового волокна после 4-х часового кипячения в $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ув. 80х)

На поверхности базальтовых волокон, подверженных длительному воздействию насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$, отсутствуют такие дефекты как трещины, поры и сколы, но наблюдаются некоторые новообразования, протяженность которых незначительна и составляет около 2% от общей длины рассматриваемого фрагмента волокна.

Для анализа влияния «обработанных» по данной методике волокон на характеристики дисперсно-армированного напрягающего цемента были исследованы прочностные показатели и кинетика развития свободных и связанных деформаций расширения.

Для выявления влияния базальтового волокна на прочностные характеристики, а также величину свободных и связанных деформаций расширяющихся систем были заформованы 2 партии образцов: без армирования (контрольная) – НЦ; армированная базальтовым волокном – НЦФ. Прочностные характеристики определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4⁷. Определение величины собственных деформаций выполнено в соответствии с требованиями СТБ 1335⁸.

На рисунке 6 представлены зависимости изменения свободных и связанных деформаций исследуемых партий образцов во времени.

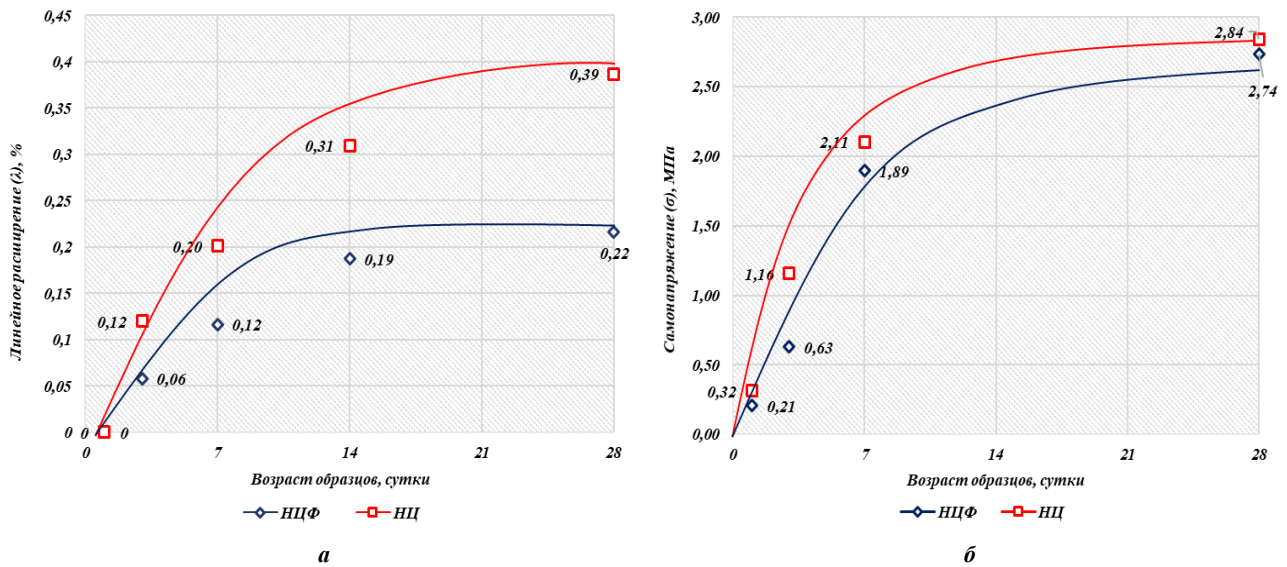


Рисунок 6. – Зависимость изменения свободных (а) и связанных (б) деформаций во времени образцов исследуемых партий (1, 2)

Как видно из рисунка 6, образцы партии 2 (НЦФ) как в случае свободных, так в случае связанных деформаций имеют значения ниже образцов партии 1 (НЦ), то есть базальтовое волокно ограничивает рост деформаций расширения. Это можно объяснить тем, что базальтовое волокно, обладая высокой адгезией к цементной матрице (в силу природы происхождения), разделяясь на монофиламенты и хаотично распределяясь в ней, формирует пространственный каркас определенной жесткости, что ограничивает перемещение составляющих расширяющейся цементной матрицы и приводит к возникновению самонапряжения даже в условиях т.н. свободного расширения.

Если сравнивать прочностные показатели исследуемых партий образцов (НЦ и НЦФ) (рисунок 7), то дисперсное армирование расширяющихся цементных систем даже «обработанным» базальтовым волокном наглядно демонстрирует возможности повышения сопротивления как растягивающим, так и сжимающим напряжениям.

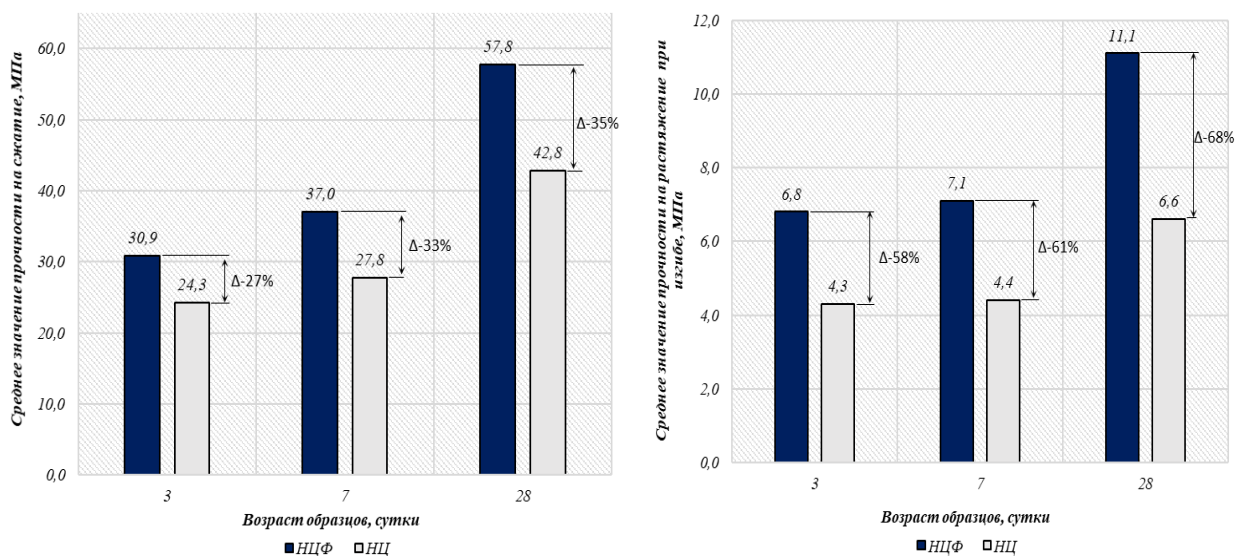


Рисунок 7. – Прочность на сжатие и растяжение при изгибе образцов исследуемых партий (НЦ, НЦФ)

⁷ См. сноску 5.

⁸ См. сноску 6.

Анализ полученных в ходе исследований данных позволяет с большой уверенностью говорить о целесообразности применения данного волокна в качестве армирующего компонента расширяющихся систем с высокой энергией расширения (см. рисунок 7).

Таким образом, комплекс проведенных исследований стойкости базальтовых волокон в щелочной среде, включающий микроскопический анализ и прямые испытания, свидетельствуют об эффективности применения базальтового волокна в качестве армирующего компонента расширяющихся цементных систем, в том числе с высокой энергией расширения.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Введение базальтового волокна в количестве 5% в активные составы приводит к ограничению собственных деформаций (свободное расширение снизилось на 43,6%, связанное – на 3,5%). При этом полученные значения расширения (0,22%) и самоупругения (2,74 МПа) по-прежнему соответствуют высокоактивному НЦ. Прочностные показатели для исследуемых образцов выросли соответственно на 35% (прочность на сжатие) и на 68% (прочность на растяжение при изгибе) (в возрасте 28 суток). Как следствие, применение дисперсного армирования в активных расширяющихся цементных системах дает возможность за счет эффекта внутреннего ограничения нивелировать эффекты разуплотнения, позволяя получать композит с высокими прочностными характеристиками;

2. Комплекс проведенных исследований показал высокую степень стойкости базальтовых волокон в щелочной среде гидратирующего цемента (спадов прочности у образцов, армированных «обработанным» базальтовым волокном, по сравнению с контрольными образцами не наблюдается, в следствие чего данное волокно может быть рекомендовано в качестве армирующего компонента расширяющихся цементных систем (напрягающего цемента);

3. Эффективным способом создания благоприятных условий, позволяющих сохранить прочностные характеристики базальтовой фибры в цементных композитах, является применение напрягающего цемента на основе расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа (рН ≈ 11,25).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест : БПИ, 1998. – 244 с.
2. Павлова, И.П. Влияние вида дисперсного армирования на прочностные характеристики расширяющихся цементных вяжущих с высокой энергией расширения / И.П. Павлова, К.Ю. Беломесова // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – С. 111–118.
3. Voylokov, I.A. Basalt fiber concrete. Historical excursion / I.A. Voylokov, S.F. Kanayev // Engineering and construction journal. – 2009. – № 4. – P. 26–31.
4. Рабинович, Ф.Н. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов / Ф.Н. Рабинович, В.Н. Зуева, Л.В. Макеева // Стекло и керамика. – 2001. – Т. 74, № 12. – С. 29–32.
5. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами / А.А. Пашченко [и др.]. – М. : Стройиздат, 1988. – 201 с.
6. Бучкин, А.В. Цементные композиции повышенной коррозионной стойкости, армированные базальтовыми волокнами / А.В. Бучкин, В.Ф. Степанова // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 82–83.
7. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе / В.Б. Бабаев [и др.] // Вестн. Белгородского гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.
8. Левчук, Н.В. Физико-химические и технологические аспекты применения базальтовой фибры / Н.В. Левчук, Е.И. Шляхова // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2017. – № 1. – С. 135–138.

REFERENCES

1. Tur, V.V. (1998). *Eksperymental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstruksii pri primenenii napryagayushchego betona*. Brest: BPI. (In Russ.).
2. Pavlova, I.P. & Belomesova, K.Yu. (2021). Vliyanie vida dispersnogo armirovaniya na prochnostnye kharakteristiki rasshiryayushchikhsya tsementnykh vyazhushchikh s vysokoi energiei rasshireniya [Influence of disperse reinforcement on the strength properties of expansive cement binders with high expansion energy]. In D.N. Lazovskii (Eds.) [et al.] *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii*: elektron. sb. st. (111–118). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Voylokov, I.A. & Kanayev, S.F. (2009). Basalt fiber concrete. Historical excursion. *Engineering and construction journal*, (4), 26–31.
4. Rabinovich, F.N., Zueva, V.N. & Makeeva, L.V. (2001). Ustoichivost' bazal'tovykh volokon v srede gidratiruyushchikhsya tsementov. *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 74 (12), 29–32. (In Russ.).
5. Pashchenko, A.A., Serbin, V.P., Paslavskaya, A.P., Glukhovskii, V.V., Biryukovich, Yu.L., Solodovnik, A.B., ... Bem, Yu.O. (1988). *Armirovanie neorganicheskikh vyazhushchikh veshchestv mineral'nymi voloknami*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Buchkin, A.V. & Stepanova, V.F. (2006). Tsementnye kompozitsii povyshennoi korrozionnoi stoikosti, armirovannye bazal'tovymi voloknami. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (7), 82–83. (In Russ.).
7. Babaev, V.B., Strokova, V.V., Nelyubova, V.V. & Savgir, N.L. (2013). K voprosu o shchelochestoi kosti bazal'tovoi fibry v tsementnoi sisteme. *Vestn. Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V.G. Shukhova [Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]*, (2), 63–66. (In Russ.).
8. Levchuk, N.V. & Shlyakhova, E.I. (2017). Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie aspekty primeneniya bazal'tovoi fibry [Physical and Chemical Technological Aspects of Fibre Application]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, (1), 135–138. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 17.12.2021

**RESISTANCE OF BASALT FIBRE IN THE ALKALINE ENVIRONMENT
OF HYDRATING CEMENT SYSTEMS****I. PAULAVA, K. BELAMESAVA**

The paper presents studies aimed at substantiating the possibility of using basalt fiber as dispersed reinforcement in cement systems based on expanding binders with high energy of expansion (stressing cements). Alkalinity resistance of basalt fiber by the accelerated method by a four-hour exposure in a saturated solution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at temperature $t=95^\circ\text{C}$, which allows simulating the operation process within 10 years in the environment of the cement stone, has been investigated. Tensile strength of cement samples with basalt fiber treated by the accelerated method has been proposed as one of the criteria for estimating the quality of alkali-resistant fiber. The application of NC on a Portland cement base and expanding additive consisting of a mixture of highly reactive metakaolin and natural gypsum allowing a decrease in pH of the medium from values ≈ 12.13 to ≈ 11.25 is an alternative way of reducing the alkalinity of hydrating medium as the most favorable for basalt fiber location. A number of experimental studies have been conducted to determine the strength properties and self-strains of basalt fiber-reinforced self-stressing cement. Experimental and theoretical studies have revealed that basalt fiber has high alkali resistance. The introduction of basalt fiber in an amount of 5% of the binder mass makes it possible to increase compressive strength of the SSC by 35%, tensile strength at bending by 68%, with self-strain corresponding to 0.22% of free expansion and 2.74 MPa of self-stressing, respectively.

Keywords: *self-stressing cement, disperse reinforcement, basalt fibre, alkalinity, tensile strength, compressive strength, self-strain.*