

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.94:691.3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ФИБРОТОРКРЕТ-БЕТОНА

канд. техн. наук, доц. **И.П. ПАВЛОВА**; **К.Ю. БЕЛОМЕСОВА**  
(Брестский государственный технический университет)

*Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований показателей качества различных комбинаций вяжущих, применяемых в технологии торкрет-бетона. Рассмотрены возможности совместного применения расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа и базальтовой фибры для компенсации усадочных деформаций и повышения прочностных характеристик торкрет-бетона. Определено, что применение расширяющихся добавок сульфоалюминатного типа позволяет существенно сократить сроки схватывания, не ускоряя при этом начало схватывания бетона; применение базальтовой фибры, введение которой в небольших количествах вызывает распад на монофиламенты с высокой удельной поверхностью, что приводит к повышению прочности бетонного композита за счет эффекта 3D-армирования структуры и изменения вязкости разрушения. Количество расширяющейся добавки назначается исходя из позиций компенсации усадочных деформаций или достижения необходимого уровня самонапряжения.*

**Ключевые слова:** торкрет-бетон, расширяющаяся добавка сульфоалюминатного типа, базальтовая фибра, сроки схватывания, прочностные показатели.

**Введение.** Торкрет-бетон сегодня – это и название строительного материала, и способ бетонирования, и метод строительства [1, с. 4, п. 1.1]. Вплоть до настоящего времени технология торкрет-бетона успешно используется в ряде отраслей строительства для решения различных производственных задач. Более того, интерес к данному методу строительства либо способу производства работ заметно возрос в связи с увеличением объемов работ по ремонту и гидроизоляции.

Торкретирование как технологический процесс состоит из нескольких этапов, каждый из которых заключается в послойном нанесении смеси под большим давлением. Такой технологический прием позволяет достичь максимально плотного взаимодействия частиц раствора с подготовленной поверхностью, а также заполнения пустот, мелких пор и трещин.

К компонентам смеси для торкрет-бетона предъявляются требования, базирующиеся на одновременном достижении требуемых конечных характеристик готового композита (прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, долговечность и т.д.), а также зависящие от технических параметров установки для нанесения данного бетона (диаметр распылительного сопла и др.). Основными из требований к компонентам смеси являются: ограничение по крупности и форме зёрен заполнителя, а также требования по непрерывной гранулометрии; вид цемента (быстротвердеющий). Необходимо отметить, что торкрет-бетонные смеси отличаются повышенными расходами цемента, поэтому применение алитовых порландцементов приведет к серьезному риску возникновения усадочных деформаций и, как следствие, к микротрещинообразованию с последующим снижением эксплуатационных качеств [2, с. 5].

Для компенсации усадочных деформаций бетона применяются в качестве вяжущего расширяющиеся или напрягающие цементы. В процессе твердения таких цементов (РЦ, НЦ) происходит расширение, которое вызвано возникновением в структуре цементного камня новообразований, объем которых существенно превышает объем вступающих в реакцию исходных веществ. На основании существующих, а также собственных исследований в данной области сделан вывод, что наиболее эффективными являются напрягающие цементы типа «М» или «К», механизм расширения которых происходит за счет образования повышенного количества этtringита ( $C_3A\cdot 3H_{32}$ ) [3, с. 102].

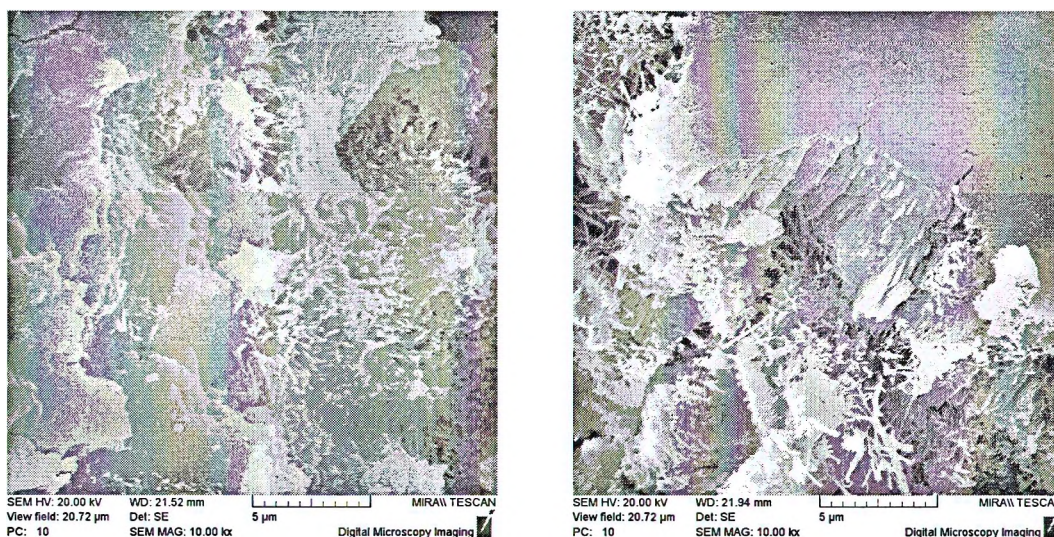
Что касается самой технологии нанесения торкрет-бетона, необходимо отметить, что она отличается рядом особенностей, среди которых возможность нанесения состава на криволинейные поверхности, а также поверхности, расположенные в любых плоскостях. Главная задача при нанесении материала на поверхности, находящиеся в любых плоскостях, – исключение вероятности оплыва или обрушения свеженанесенного торкрет-бетона. Таковую задачу следует решать, изменяя вязкость смеси и ускоряя период схватывания. Ускорения схватывания можно достичь за счет ранней гидратации высокоалюминатной составляющей расширяющейся добавки, а увеличения вязкости – за счет введения базальтовой фибры. Совместным введением фибры и расширяющейся добавки возможно добиться ускорения кинетики набора прочности, сохранив при этом сроки схватывания свежего торкрет-бетона.

**Постановка задачи.** Для проявления деформаций расширения в качестве расширяющейся добавки применялась композиция, состоящая из высокоактивного метакеолина (ВМК) и природного гипса. Метакеолин участвует не только в механизме расширения напрягающего цемента, но также оказывает большое влияние на структуру цементного камня в затвердевшем бетоне, а именно уплотняет ее. Достигается такое уплотнение за счет размера дисперсных частиц метакеолина, которые на порядок меньше частиц вяжущего вещества (портландцемента, гипса). Высокое содержание диоксида кремния с высокой удельной поверхностью, т.е. в активной форме, приводит к проявлению пуццоланового эффекта, в результате которого связывается свободная известь. В итоге проявляются, накладываясь друг на друга и усиливая синергетизм явлений, следующие эффекты: эффект микронаполнения, расширения и пуццолановый.

Кроме того, альтернативно в качестве расширяющейся добавки и ускорителя твердения рассматривался коллоидальный раствор сульфата алюминия. Свойства коллоидальной формы сульфата алюминия сопоставимы по физико-химическим характеристикам с наиболее известными зарубежными аналогами [4, с. 25]. Рекомендуемый диапазон дозировок добавки от массы цемента (в пересчете на сухое вещество) составляет 1...5%, в то время как дозировки расширяющейся добавки на основе метакеолина и гипса в пределах 10...25% в зависимости от требуемой энергоактивности состава [5, с. 3].

Применяя в качестве ускорителя твердения добавку коллоидального сульфата алюминия и регулируя процент ее введения в цементную систему, можно корректировать временной диапазон начала набора прочности всей системы и итоговое соотношение сульфатов и алюминатов как источника расширения цементных систем.

Для регулирования вязкости и предотвращения «оплывов» свеженанесенной высокоподвижной торкрет-смеси в состав вводилась базальтовая фибра, которая за счет распушки на монофиламенты высокой степени дисперсности (диаметр волокна 2...5 мкм), создает эффект так называемого 3D-армирования, что четко видно на микрофотографии (рисунок 1). При этом параллельно возникает химическое объемное армирование за счет роста длинных иглоподобных кристаллов этtringита в процессе расширения. Таким образом, проявляется химико-механическое объемное микроармирование структуры и, как результат, повышение прочности, в частности на растяжение, и непроницаемости композитной структуры.



**Рисунок 1. – Образцы цемента, модифицированные расширяющейся добавкой и базальтовой фиброй**

#### Экспериментальные исследования и их анализ

В таблице 1 представлены результаты исследования влияния добавки коллоидального сульфата алюминия в количестве 4% (от массы вяжущего вещества) на сроки схватывания цементного теста.

Базовым значением нормальной плотности цементного теста принято 27% (состав 1), составы 2 и 3 доводились до значения НГ = 27% за счет введения в них пластифицирующей добавки первой группы на поликарбоксилатной основе. Оптимальное количество пластификатора определено опытным путем для каждого состава отдельно.

Полученные данные свидетельствуют о том, что введение расширяющейся добавки в цементную систему значительно замедляет начало ее схватывания, но при этом диапазон времени между началом и концом схватывания составляет около полутора часов (состав 2), что почти вдвое меньше, чем у бездо-



бавочного состава на портландцементе (состав 1). Таким образом, сохраняя возможность работать со смесью на объекте, проявляются положительные эффекты – ускоренный набор прочности.

Таблица 1. – Сроки схватывания цементного теста с добавками

№ опытного состава	Компоненты опытного состава	НГ, %	Сроки схватывания, ч-мин	
			начало	конец
1	ПЦ	27	0:42	3:22
2	НЦ + пл.	27	3:06	4:16
3	НЦ + пл. + КРСА (4%)	27	1:52	3:32

ПЦ – портландцемент; НЦ – напрягающий цемент; пл. – пластификатор; КРСА – коллоидальный раствор сульфата алюминия; НГ – нормальная густота.

Влияние *добавки коллоидального сульфата алюминия* на сроки схватывания напрягающего цемента сокращает начало схватывания практически в два раза (состав 3), но при этом временной диапазон между началом и концом схватывания остается таким же, как и у состава 2, а это значит, что добавка коллоидального сульфата алюминия может привести к необходимости введения дополнительного количества замедлителей схватывания для модифицированных торкрет-бетонов.

На сегодняшний день существует мнение, что применение в качестве вяжущего вещества энергоактивного расширяющегося или напрягающего цемента вызывает частичную потерю прочности конечного продукта из-за разуплотнения структуры крупными кристаллами этtringита. Поскольку прочность является важнейшей характеристикой бетона как конструкционного материала, которая косвенно определяет долговечность и эксплуатационную надежность, то возникает необходимость создания благоприятного напряженно-деформированного состояния структуры напрягающего бетона на стадии расширения и уплотнения порового пространства мелкокристаллическим этtringитом, что достигается за счет объемного армирования, в данном случае дисперсного.

*Дисперсное армирование базальтовым волокном* обладает рядом преимуществ перед другими типами волокон [6, с. 35]. По своей структуре базальтовое волокно схоже с цементным камнем и обладает природной естественной шероховатостью, за счет чего достигается высокая степень сцепления волокна с цементной матрицей. Базальтовая фибра как готовый продукт представляет собой отрезки комплексного базальтового волокна заданной длины (обычно 16, 24 мм), состоящие из отдельных монофиламентов, собранных во временные пучки. После введения базальтового волокна и тщательного перемешивания с сухими компонентами бетонной смеси данное комплексное волокно распадается на множество отдельных монофиламентов, которые, в свою очередь, распределяются по объему смеси во всех направлениях под разными углами и вызывают тем самым эффект 3D-армирования. В то же время такая способность базальтового волокна оказывает влияние на подвижность готовой бетонной смеси, что связано с резким увеличением удельной поверхности распушенной фибры и, как следствие, с возрастанием водопотребности бетонной смеси.

Для определения степени влияния базальтовой фибры на подвижность и водопотребность бетонной смеси выполнен ряд экспериментальных исследований для следующих составов: состав № 1 – на основе портландцемента (контрольный); состав № 2 – на основе портландцемента с дисперсным армированием базальтовой фиброй в количестве 5% от массы вяжущего; состав № 3 – на основе напрягающего цемента; состав № 4 – на основе напрягающего цемента с дисперсным армированием базальтовой фиброй в количестве 5% от массы вяжущего. Контрольные составы 1 и 3 – равноподвижные. Результаты, полученные в ходе исследования, представлены в виде гистограмм на рисунке 2.

Для определения влияния базальтового волокна как армирующего компонента на прочностные характеристики торкрет-бетона также проводился ряд экспериментальных исследований. Были заформованы три серии опытных образцов: 1 серия – напрягающий цемент (НЦ); 2 серия – НЦ + КРСА (4%); 3 серия – НЦ + КРСА (4%) + базальтовая фибра (5% от массы вяжущего вещества). В состав компонентов всех серий входила пластифицирующая добавка I группы на поликарбоксилатной основе. Результаты постановочных исследований представлены в виде диаграмм на рисунке 3.

Анализ полученных данных показал, что применение базальтовой фибры в качестве армирующего компонента торкрет-бетона целесообразно. Согласно полученным данным, значения прочностей образцов серии 1 (без армирования) в возрасте 28 суток примерно на 20% меньше значения прочностей образцов серии 3 (армированных базальтовой фиброй). Таким образом, введение в смесь базальтовых волокон способствует увеличению прочности за счет сцепления с модифицированной цементной матрицей и создания эффекта объемного микроармирования.

Также необходимо отметить, что при введении базальтовой фибры увеличивается вязкость смеси, что является весьма благоприятным фактором для торкрет-бетона. Увеличение вязкости обусловлено

расщеплением одного базальтового волокна на множество мельчайших монофиламентов, которые обволакивают все компоненты смеси и образуют единую пластично-вязкую систему.

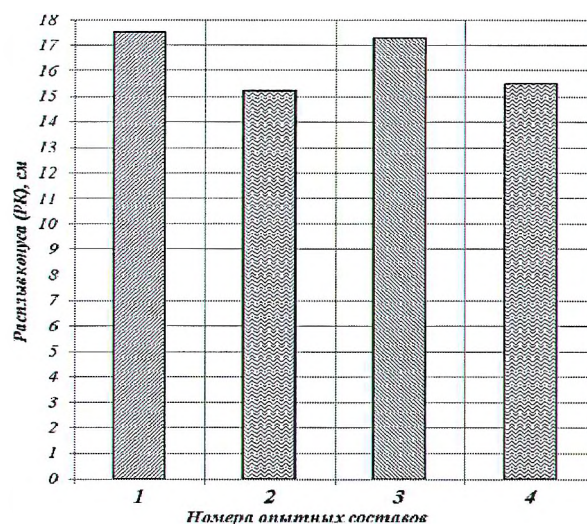
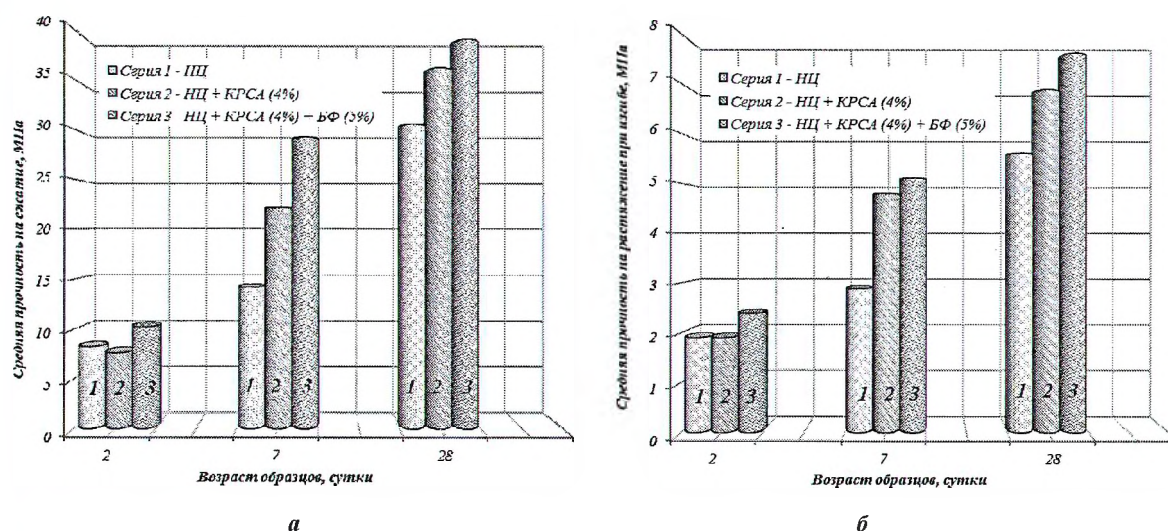


Рисунок 2. – Значения распыва конуса (PK, см) опытных составов



НЦ – напрягающий цемент;  
КРСА – коллоидальный раствор сульфата алюминия; БФ – базальтовая фибра

Рисунок 3. – Результаты испытаний прочности на сжатие (а) и на растяжение при изгибе (б) опытных образцов

В ходе экспериментальных исследований важно было также оценить степень влияния ускорителя схватывания на прочностные характеристики торкрет-бетона. По полученным данным видно, что добавка КРСА оказывает положительное влияние на рост прочностных характеристик фиброторкрет-бетона (рисунок 3, серия 2). Обусловлено такое влияние наличием в основе данной добавки коллоидального сульфата алюминия. При введении в цементную систему дополнительного источника быстрогидратирующих алюминатов интенсифицируется образование раннего этtringита, и в этом смысле механизм набора прочности портландцемента с нещелочными ускорителями данного типа во многом аналогичен сульфатно-алюминатному цементу [4, с. 25].

Анализ выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать следующие **выводы**:

- торкрет-бетон является перспективным строительным материалом с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками, в особенности для ремонта сооружений, в том числе эксплуатируемых в средах разной степени агрессивности;



- торкрет-бетон не лишен недостатков, обусловленных и самой структурой искусственного композита, и технологией изготовления: усадочные деформации, необходимость ускорения набора прочности и предотвращения «оплывов»;

- применение расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа как компонента вяжущего для торкрет-бетона позволит компенсировать негативные усадочные напряжения и создать в ряде случаев деформации расширения;

- применение совместно с расширяющейся добавкой коллоидального раствора сульфата алюминия позволяет ускорить рост кристаллов раннего этtringита как источника расширения и химического армирования структуры, но при этом приводит к сокращению сроков схватывания, что может в ряде случаев привести к трудностям технологии. Поэтому расширение в дальнейшем следует обеспечивать за счет варьирования состава и количества расширяющейся добавки без дополнительной активации КРСА;

- введение параллельно с расширяющимися компонентами базальтовой фибры позволяет не только предотвратить нежелательные «оплывы», но и создать совместное с расширяющейся цементной системой 3D-армирование, что в итоге приводит к получению композита с высокими эксплуатационными характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брукс, Г. Торкрет-бетон, торкрет-цемент, торкрет-штукатурка / Г. Брукс, Р. Линдер, Г. Руфферт ; пер. с нем. М.В. Алешечкиной, Э.А. Липкинда ; под ред. Л.А. Феднера. – М. : Стройиздат, 1985. – 205 с.
2. Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / М.Ю. Титов ; НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. – М., 2012. – 22 с.
3. Павлова, И.П. Исследование влияния расширяющихся сульфодерритных и сульфоалюминатных добавок на прочностные показатели и собственные деформации цементных систем / И.П. Павлова, Т.В. Каленюк, К.Ю. Беломесова // Весн. БрГТУ. – 2016. – № 1. Сер. Строительство и архитектура. – С. 123–127.
4. Вовк, А.И. «Реламикс Торкрет»: механизм действия и особенности набора прочности торкрет-бетоном / А.И. Вовк // Технологии бетонов. – 2011. – № 11–12. – С. 25–27.
5. Ускоритель схватывания «Реламикс Торкрет». Технические условия : ТУ 5745-028-58042865-2008. – Введ. 04.02.08. – М. : ФГУП «НИЦ «Строительство»», 2008. – 24 с.
6. 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.

Поступила 07.12.2017

#### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL MIX AND PROPERTIES RESEARCH OF EXPANSIVE FIBERSHOTCRETE

I. PAULAVA, K. BELAMESAVA

*In present paper experimental-theoretical research of quality level for different mixes of binding, used in shotcrete technology, are proposed. Probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for shrinkage compensating and strength shotcrete properties increasing. Are considered this determined that use of sulfo-aluminate type expansive additive make it possible considerably shortening setting time, but not influencing on the initial set. Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to concrete composite strength increase course of 3D-structure reinforcement effect and changing fracture toughness. Amount of expansive additive assign proceeding from shrinkage compensating or achievement of necessary self-stress level.*

**Keywords:** shotcrete, sulfo-aluminate type expansive additive, basalt fiber, setting time, strength properties