

Павлова Инесса Павловна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры, УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест (Беларусь)

Беломесова Кристина Юрьевна, аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест (Беларусь)

Inesa Paulava, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

Krystyna Belamesava, PhD student, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ТОРКРЕТ-БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ДОБАВКОЙ И БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ

EXPERIMENTAL MIX AND PROPERTIES RESEARCH OF SHOTCRETE, MODIFIED EXPANSIVE ADDITIVE AND BASALT FIBER

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены экспериментально-теоретические исследования показателей качества, таких как сроки схватывания и прочностные характеристики 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, в частности – динамики набора ранней прочности как одного из основных показателей качества торкрет-бетонов. Определено, что применение расширяющихся добавок сульфоалюминатного типа, в том числе модификаторов на основе коллоидального сульфата алюминия, позволяет существенно

сократить сроки схватывания, при этом не ускоряя само начало схватывания, что является одним из основных требований в технологии производства работ методом торкретирования. Применение базальтовой фибры, введение которой в небольших количествах благодаря распаду на монофиломенты с высокой удельной поверхностью приводит к повышению прочности бетонного композита за счет эффекта 3-D армирования структуры и изменения вязкости разрушения. Количество расширяющейся добавки назначается исходя из позиций компенсации усадочных деформаций или достижения необходимого уровня самонапряжения. Максимальное содержание базальтовой фибры ограничивается до 5%, чтобы предотвратить эффект перколяции, но обеспечить формирование условного «пространственного каркаса» из волокон фибры. Комплексное использование модифицирующей расширяющейся добавки и базальтовой фибры позволяет спрогнозировать за счет химико-механического объемного армирования структуры повышение непроницаемости и, как следствие, долговечности такого рода бетонов, что предопределяет перспективы их применения для ремонта различного рода зданий и сооружений, в том числе эксплуатируемых в различных агрессивных средах.

ABSTRACT

In present paper experimental-theoretical research of quality level such as setting time and strengthening properties for different mixes of binding, used in shotcrete technology, are proposed. Are considered probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for shrinkage compensating and strength properties increasing, partially–dynamic in early strength increase as one of main quality factor for shotcrete. Determined that use of sulfo-aluminate type expansive additive, including modifier on the base of colloidal aluminum sulfate, make it possible considerably shortening setting time, but not influencing on the initial set, which is one of main requirements in shotcrete technology. 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 3-D structure reinforcement effect and changing fracture toughness. Amount

of expansive additive assign proceeding from shrinkage compensating or achievement of necessary self-stress level. Maximum amount of basalt fiber limit to 5% cause to prevent percolation effect, but to provide formation of filament spatial framework. Complex use of modifier expansive additive and basalt fiber allow to prognoses at the expense of chemical-mechanical three-dimensional structure reinforcement reduce of permeability and durability increase this type of concrete, what predetermine horizons for renovation of different buildings and structures, including exploited in different aggressive environments.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Понятие торкрет-бетон существует достаточно давно и включает в себя и название строительного материала, и способ бетонирования, и метод строительства [1, с. 4, п. 1.1]. На сегодняшний день 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 строительных работ.

В общем торкретирование как технологический процесс состоит из нескольких этапов, каждый из которых заключается в послойном нанесении цементно-песчаного раствора или бетонной смеси под большим давлением. Нанесение смеси таким способом 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 достижении требуемых конечных характеристик готового композита (прочность, водонепроницае-

мость, 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:

- крупность заполнителя и непрерывная гранулометрия;
- форма зёрен заполнителя (окатанная);
- вид цемента (быстротвердеющий).

Необходимо отметить, что при применении для торкретирования бетон на основе алитового портландцемента велика вероятность возникновения усадочных деформаций, которые чреваты микротрещинообразованием и последующим снижением эксплуатационных характеристик [2, с. 5].

Для частичного снижения или полной компенсации усадочных деформаций бетона необходимо применять 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, наиболее эффективными являются напрягающие цементы типа М или К, механизм расширения которых происходит за счет образования повышенного количества этtringита – высокоосновной формы гидросульфоалюмината кальция [3, с. 102].

Возвращаясь непосредственно к 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. При этом главной задачей при нанесении данного бетона на поверхности, находящиеся в любых плоскостях, является исключение вероятности оплыва или обрушения свеженанесенного торкрет-бетона. Решить такую задачу возможно благодаря изменению вязкости смеси и ускорению периода схватывания. Ускорение схватывания возможно за счет ранней гидратации высокоалюминатной составляющей расширяющейся добавки, а изменение вязкости за счет введения базальтовой фибры. Совместное введение фибры и расширяющейся добавки

позволит добиться ускорения процесса набора прочности, а также сократить сроки схватывания свежего торкрет-бетона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для компенсации усадочных деформаций в качестве расширяющейся добавки применялась композиция, состоящая из высокоактивного метакеолина (ВМК) и природного гипса. Важно отметить, что метакеолин, являясь одним из компонентов расширяющейся добавки, 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 тонины вяжущего вещества (портландцемента, гипса). Кроме того, альтернативно в качестве расширяющейся добавки и ускорителя сроков схватывания 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% [5, с. 3].

В случае применения напрягающего цемента, состоящего из смеси портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из высокоактивного метакеолина и природного гипса, введение ускорителя схватывания является необходимым условием для проведения работ по нанесению бетонной смеси методом торкретирования. Так как из-за применения природного гипса в качестве одного из компонентов расширяющейся добавки происходит значительное замедление начала схватывания всей цементной системы. Применяя в качестве ускорителя схватывания добавку коллоидального сульфата алюминия и регулируя процент ее введения в цементную систему, можно корректировать временной диапазон начала схватывания всей системы и итоговое соотношение сульфатов и алюминатов как источника расширения цементных систем.

Для регулирования вязкости и предотвращения «оплывов» свеженанесенной торкрет-смеси в состав вводилась базальтовая фибра, которая за счет распушки на элементарные волокна высокой степени дисперсности (диаметр волокна 2–5 мкм) создает эффект так называемого 3-D армирования, что четко видно на микрофотографии (см. рис. 1).

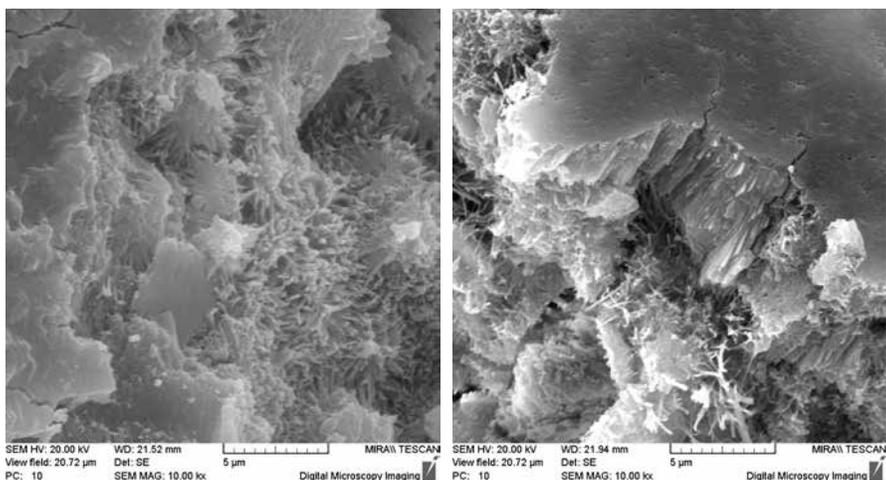


Рисунок 1. Микрофотографии образцов цемента, модифицированных расширяющейся добавкой и базальтовой фиброй

При этом параллельно возникает химическое объемное армирование за счет роста длинных иглоподобных кристаллов этtringита в процессе расширения. Таким образом, следует ожидать химико-механического объемного микроармирования структуры, что в итоге приводит к повышению прочности и непроницаемости композитной структуры.

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.

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.

Базовым значением нормальной густоты цементного теста было 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 было определено опытным путем для каждого состава отдельно.

Из полученных данных видно, 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 бездобавочного состава на портландцементе (состав 1). Что же касается влияния добавки коллоидального сульфата алюминия на сроки схватывания напрягающего цемента, то благодаря ей начало схватывания наступает в два раза быстрее (состав 3), но при этом временной диапазон между началом и концом схватывания остается таким же, как и у состава 2. Таким образом, добавка коллоидального сульфата алюминия позволяет без труда применять напрягающий цемент в качестве вяжущего вещества для торкрет-бетона.

На сегодняшний день существует мнение, что применение в качестве вяжущего вещества расширяющегося или напрягающего цемента приводит к частичной потере прочности конечного продукта. При этом именно прочность является важнейшей характеристикой бетона как конструкционного материала, которая косвенно предопределяет ряд таких свойств, как модуль

упругости, сопротивление растяжению, износу и истиранию, непроницаемость, коррозионностойкость и т.д.

Дисперсное армирование базальтовым волокном обладает рядом преимуществ перед другими типами волокон [6, с. 35]. По своей природе базальтовое волокно (фибра) является продуктом обработки горной породы типа базальта, который обладает высокими прочностными показателями. Базальтовая фибра как готовый продукт представляет собой отрезки комплексного базальтового волокна заданной длины в виде рассыпчатых монофиламентов. По своей структуре фибра схожа с цементным камнем и обладает природной естественной шероховатостью, благодаря чему достигается высокое сцепление волокон с цементной матрицей, а за счет способности разделения волокна на отдельные монофиламенты достигается равномерное распределение волокон по всему объему смеси.

Для определения влияния базальтового волокна как армирующего компонента на прочностные характеристики торкрет-бетона был произведен 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 2.

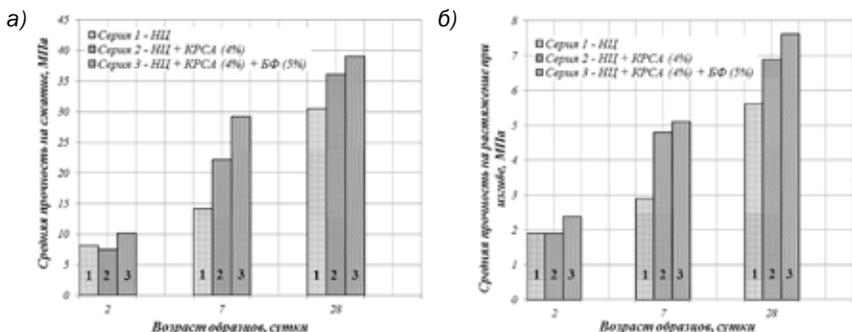


Рисунок 2. Результаты испытаний прочности на сжатие (а) и на растяжение при изгибе (б) опытных образцов

Анализируя полученные данные, можно с уверенностью сказать, что применение базальтовой фибры в качестве армирующего компонента торкрет-бетона является целесообразным. По 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.

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 2, серия 2). Обусловлено такое влияние наличием в основе данной добавки коллоидального сульфата алюминия. При введении в цементную систему дополнительный источник быстрогидратирующих алюминатов интенсифицируется образование раннего этtringита, и в этом смысле механизм набора прочности портландцемента с нещелочными ускорителями данного типа во многом аналогичен сульфоалюминатному цементу [4, с. 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. 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;
2. Как любой строительный материал, торкрет-бетон не лишен недостатков, обусловленных и самой структурой, и технологией изготовления – усадочные деформации, необходимость сокращения сроков схватывания и предотвращения «оплывов»;
 3. Применение расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа как компонента вяжущего для торкрет-бетона позволит компенсировать негативные усадочные напряжения и создать в ряде случаев деформации расширения;
 4. Применение совместно с расширяющейся добавкой коллоидального раствора сульфата алюминия позволяет не только существенно сократить сроки схватывания цементных систем, что является одним из базовых условий в технологии торкрет-бетонов, но и ускорить рост кристаллов раннего этtringита как источник расширения и химического армирования структуры;
 5. Введение параллельно с расширяющимися компонентами базальтовой фибры позволяет не только предотвратить нежелательные «оплывы», но и создать совместное с расширяющейся цементной системой 3-D армирование, что в итоге приводит к получению композита с высокими эксплуатационными показателями (включая прочность, непроницаемость и долговечность).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Брукс, Г. Торкрет-бетон, торкрет-цемент, торкрет-штукатурка / Г. Брукс, Р. Линдер, Г. Руфферт ; Пер. с нем. М. В. Алешечкиной, З. 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. на соискание ученой степени 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 сульфферритных и сульфоалюминатных добавок на прочностные показатели и собственные деформации цементных систем / И. П. Павлова, Т. В. Каленюк, К Ю. Беломесова // Весн. БрГТУ., Сер. Строительство и архитектура. – 2016. – № 1. – 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 // 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.

REFERENCES

1. Bruks G., Linder R., Ruffert G. *Torkret-beton, torkret-tsement, torkret-shtukaturka* [Shotcrete, pneumatic cement and pneumatic mortar]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 205 p. (rus)
2. Titov M. Yu. *Betony s kompensirovannoy usadkoy na rasshiryayushchikh dobavkakh* [Shrinkage compensating concrete based on expansive additive] : avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05; NIIZHB im. A. A. Gvozdeva. Moscow, 2012. 22 p. (rus)
3. Pavlova I. P., Kalenyuk T. V, Belomesova K.Yu. Issledovanie vliyaniya rasshiryayushchikhsya sulfoferritnykh i sulfoalyuminatnykh dobavok na prochnostnye pokazateli i sobstvennye deformatsii tsementnykh system [Research of expansive sulfo-ferrite and sulfo-aluminate additives on binding cementitious systems strength properties and self-strains]. *Bulletin of BrSTU*. 2016. No. 1. pp. 123-127.

4. Vovk A. I. «Relamiks Torkret»: mekhanizm deystviya i osobenosti nabora prochnosti torkret-betonom [«Relamiks Torkret»: action mechanism and specific of strengthening for shotcrete]. *Tekhnologii betonov*. 2011. No. 11–12. pp. 25–27.
5. *Uskoritel skhvatyvaniya «Relamiks Torkret»*. *Tekhnicheskie usloviya : TU 5745-028-58042865-2008*. [Setting agent «Relamiks Torkret». Standard specification]. Moscow : FGUP «NITS «Stroitelstvo»», 2008. 24 p. (rus)
6. Belomesova K. Yu. *Primenenie bazaltovoy fibry v kachestve armiruyushchego komponenta v tsementno-peschanykh kompozitakh* [Usage of basalt fiber such as component of reinforcement in cement-sand composites] // *Traditsii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : sb. nauch. st.* GrGU im. YA. Kupaly. Grodno: GrGU, 2016. pp. 74–77. (rus)