

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ РАСШИРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СУЛЬФОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ

С. В. Самченко¹, Н. С. Трунтов², Ф. Б. Шукшин³

¹ Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет e-mail: SamchenkoSV@mgsu.ru

² Студент 2-го курса 31 группы ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: n_truntov@mail.ru

³ Студент 2-го курса 31 группы ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: robin.dreik@yandex.ru

Реферат

Предмет исследования. Композиционные материалы с эффектом расширения на основе добавок различной природы и противоположных по эффекту формирования структуры процессов расширения и уплотнения.

Цели: описание целей исследования. Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела и изучение структуры затвердевших образцов.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов в работе использовались – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Евроцемент М500, сульфоалюминат кальция (САК) в виде тонкомолотого сульфоалюминатного цемента, а также гипсовый камень с содержанием $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 93,20 %. В качестве пуццолановой добавки использовали трепел Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,40 г/см³. Определяли прочность на сжатие образцов и их деформационные характеристики. Структура затвердевшего композиционного материала определялась электронно-микроскопическим анализом.

Результаты. Прочность образцов в одни сутки у композиционного материала на 26 % выше, чем у бездобавочного портландцемента, но при дальнейшем твердении прирост ее отстает в трех- и семисуточном возрасте и приближается к прочности контрольного образца только в 28 сут. Такое замедление роста прочности у композиционного материала обусловлено ростом расширения твердеющей системы до семи суток с последующей стабилизацией этой величины. У контрольных образцов портландцемента фиксируется усадка, что обуславливает более интенсивное нарастание прочности за счет уплотнения твердеющей структуры. Изучение структуры затвердевшей цементной пасты композиционного материала показало, что в его составе развиваются кристаллы этрингита, помимо этого, фиксируются высокоосновные и низкоосновные гидросиликаты кальция, которые формируют плотную структуру.

Ключевые слова: композиционные материалы с эффектом расширения, сульфоалюминат кальция, пуццолановая добавка трепел, электронно-микроскопический анализ, усадочная деформация, механизм расширения цементного камня, сульфоалюминатное расширение, оксидное расширение.

Введение

Одной из основных проблем традиционных строительных материалов является их предрасположенность к усадке, вследствие которой могут появляться трещины, ухудшаться сцепление с основанием, а также снижаться прочность. Для снижения усадочных деформаций широко используются композиционные материалы с эффектом расширения. Такие материалы при твердении обеспечивают увеличение объема цементного камня, его уплотнение и самонапряжение, придают бетонам и растворам высокую водонепроницаемость, благодаря чему их успешно применяют для омоноличивания железобетонных элементов, а также изготовления самих железобетонных изделий.

Основными факторами, определяющими технические свойства композиционных материалов, является его рецептурный, природа расширяющегося компонента, минералогический состав портландцементного клинкера, гранулометрический состав цемента и его компонентов.

При признанной эффективности производства композиционным материалам с эффектом расширения в настоящее время не уделяется значительного внимания. Это касается не только расширения ассортимента специальных цементов, но и использование их для создания различных видов добавок, в которых развиваются различные процессы при гидратации и твердении цементных паст. Поэтому исследования совместного влияния расширяющихся добавок в сочетании с пуццолановыми добавками для создания композиционных материалов с эффектом расширения является актуальным.

Наиболее распространенным способом получения композиционных материалов с эффектом расширения является совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок расширяющихся и пуццолановых [1]. В качестве расширяющихся добавок широкое распространение получили глиноземистые шлаки и сульфатированные клинкера [2, 34]. Такие добавки позволяют обеспечить постепенное расширение цементного камня и сохранять его в течение длительного времени. В качестве пуццолановых добавок используются как добавки природного (опоки, трепел и др.), так и добавки искусственного происхождения, например микрокремнезем [4].

Существует два основных механизма расширения цементного камня: оксидное расширение в процессе гидратации CaO и MgO до Ca(OH)_2 и Mg(OH)_2 и сульфоалюминатное расширение вследствие образования гидросульфоалюмината кальция.

Расширение возникает из-за раздвижения в результате гидратации кристаллического каркаса в твердеющей цементной пасте и увеличении её объема. Дело в том, что гидроксиды кальция и магния имеют больший объем, чем исходные оксиды. Сульфатное расширение происходит из-за образования эттрингита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ гидросульфоалюмината кальция), его объем больше исходных компонентов более чем в два раза. Важно заметить, что образование

гидросульфоалюмината кальция и вызываемое им расширение должно проходить в начале твердения, когда мы имеем пластичное тесто, тогда можно избежать появления трещин и снижение качества материала. В результате сульфоалюминатного расширения появляется возможность достичь увеличения линейных размеров цементного камня на 4–5 %. Процесс расширения цементного камня будет длиться в течение всего процесса схватывания, и такое действие будет продолжаться в течение недели.

Среди факторов, определяющих технические свойства композиционных материалов, особое внимание уделяется дисперсности цемента и его компонентов. Дисперсность, как и гранулометрический состав различных видов расширяющихся добавок, оказывают существенное влияние на процессы гидратации и формирование структуры цементного камня, морфологию кристаллов эттрингита и в целом на свойства композиционных материалов с эффектом расширения. Мелкие фракции расширяющихся добавок обеспечивают образование большого количества центров кристаллизации, а частицы грубых фракций обуславливают рост крупных кристаллов. Для расширяющих добавок на основе сульфоалюмината кальция предпочтителен полифракционный состав, где содержание минералов должно быть как в мелких фракциях (< 28 мкм), так и крупных фракциях (45–63 мкм) [5–7].

На образование и рост кристаллов эттрингита влияет присутствие полимерных функциональных добавок. Это обусловлено тем, что присутствие в жидкой фазе поверхностно-активных веществ приводит к созданию большого количества центров кристаллизации и росту мелковолокнистых или мелкоигловчатых кристаллов эттрингитовой фазы, что способствует формированию плотной и прочной структуры цементного камня, при гидратации вяжущих композиций на основе сульфоалюминатного цемента [8–10].

Остается открытым вопрос о совместном протекании двух противоположных по эффекту формирования структуры процессов расширения и уплотнения. Уплотнение цементного камня происходит в результате пуццолановой реакции реактивного кремнезема с гидроксидом кальция с образованием мелких низкоосновных гидросиликатов кальция. Поэтому целью данного исследования было определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела и изучение структуры затвердевших образцов.

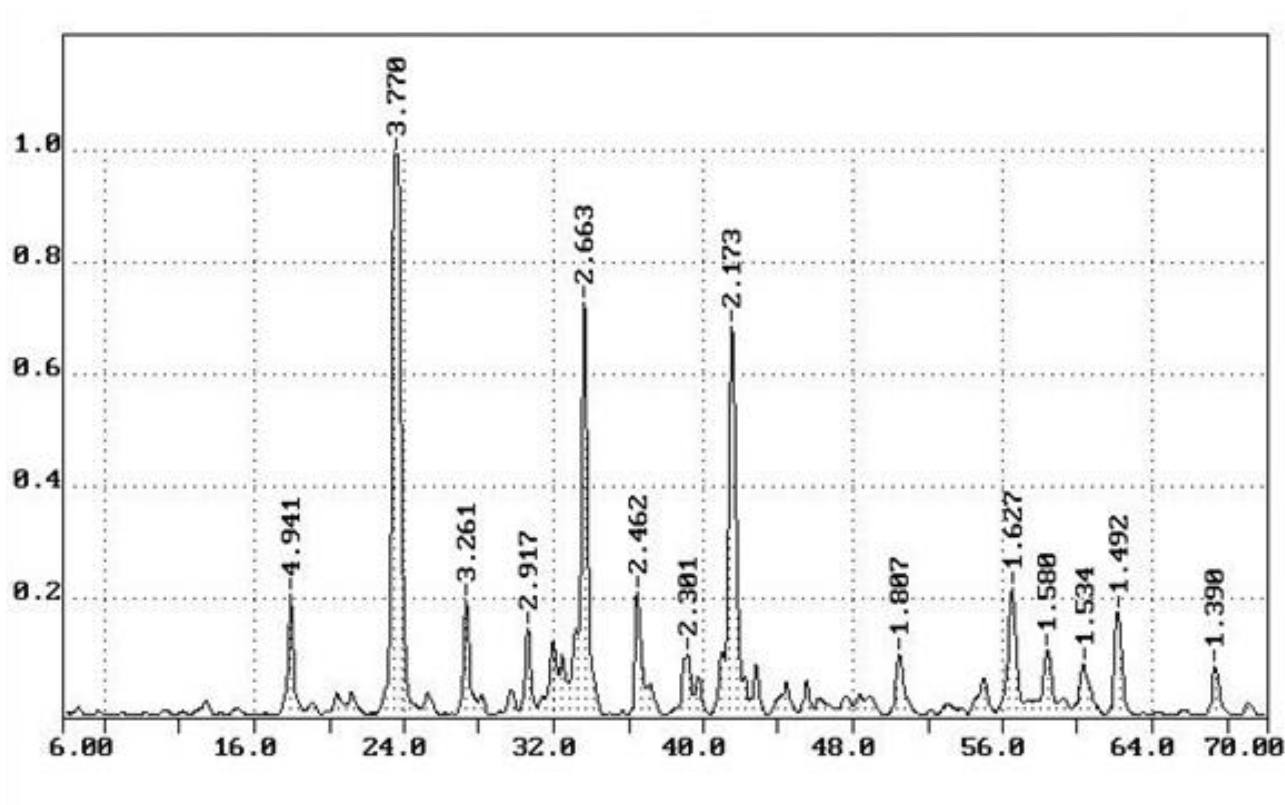
В качестве исходных материалов в работе использовались портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Евроцемент М500 с техническими условиями по ГОСТ 31108-2020, ГОСТ 30515-2013, сульфоалюминат кальция (САК) в виде тонкомолотого сульфоалюмоферритного цемента, а также гипсовый камень с содержанием $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 93,20 %. В качестве пуццолановой добавки использовали трепел Хотынецкого месторождения с истинной плотностью $2,40 \text{ г/см}^3$. Химический состав материалов представлен в таблице 1.

Сульфоалюминатный цемент имел размер зерен от нескольких мкм до 25–30 мкм. Его минералогический состав по данным рентгенофазового анализа состоит из белита (30 %) и идентифицируется по отражениям $d = 0,2785 \text{ нм}$.

Таблица 1 – Химический состав исходных материалов

№ п.п.	Наименование	Содержание оксидов, масс. %							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ппп
1	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	20,10	4,56	8,72	62,75	1,99	0,57	1,58	0,92
2	Сульфоалюминатный цемент	12,77	14,73	3,20	51,45	1,76	10,45	1,14	2,70
3	Трепел	67,33	10,68	9,36	0,80	0,84	–	3,35	7,64

Сульфоалюмината кальция содержится 65–70 % и идентифицируется по отражениям $d = 0,372; 0,263; 0,215$ нм (рисунок 1).

**Рисунок 1 – Рентгенограмма сульфоалюминатного цемента**

Физико-механические испытания цементного камня проводились в соответствии с ГОСТ 30744-2001. Для оценки прочности цементного камня на 1, 3, 7 и 28 суток были подготовлены образцы-кубики размерами граней 2×2×2 см при водоцементном отношении, равном 0,4. Образцы выдерживались в нормальных условиях (температура $t = 20 \pm 2$ °С, влажность $W = 95$ %) в камере нормального твердения CURACEM 65-L0013/D. Прочность образцов определялась с использованием гидравлического пресса CONTROLS MCC8 50-C8422.

Деформация цементного камня и бетона были измерены в течение 28 суток при погружении (в нормальном условии) в воду. Для измерений использовались образцы-балочки размером 4×4×16 см при водоцементном отношении, равном 0,4. Измерение деформаций образцов проводилось с помощью устройства для сравнения длины модели CONTROLS 62-L0035/A. Расчет деформации

цемента выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 56727-2015, а расхождения между результатами трех измерений оценивались согласно ГОСТ 11052-74 ($\pm 15\%$).

По результатам исследования выяснилось, что композиционный материал с эффектом расширения для исследования готовился смешением предварительно размолотых компонентов. Соотношение компонентов было следующим: ПЦ – 65 %, САК – 15 %, Гипс – 10 %, Трепел 10 %. В качестве контрольного образца использовался бездобавочный портландцемент.

Образцы после их изготовления хранили в воде (нормальные условия хранения). Через 1, 3, 7, 14, 21 и 28 суток образцы испытывались на прочность и расширение. Полученные прочностные характеристики приведены в таблице 2, деформационные характеристики представлены на рисунке 2.

Таблица 2 – Прочностные характеристики испытанных образцов (МПа)

№ п.п.	Наименование образца	Время твердения, сут.					
		1	3	7	14	21	28
1	контрольный	10,4	43,2	51,3	55,2	58,6	62,2
2	композиционный	14,15	37,3	46,8	52,1	55,0	59,7

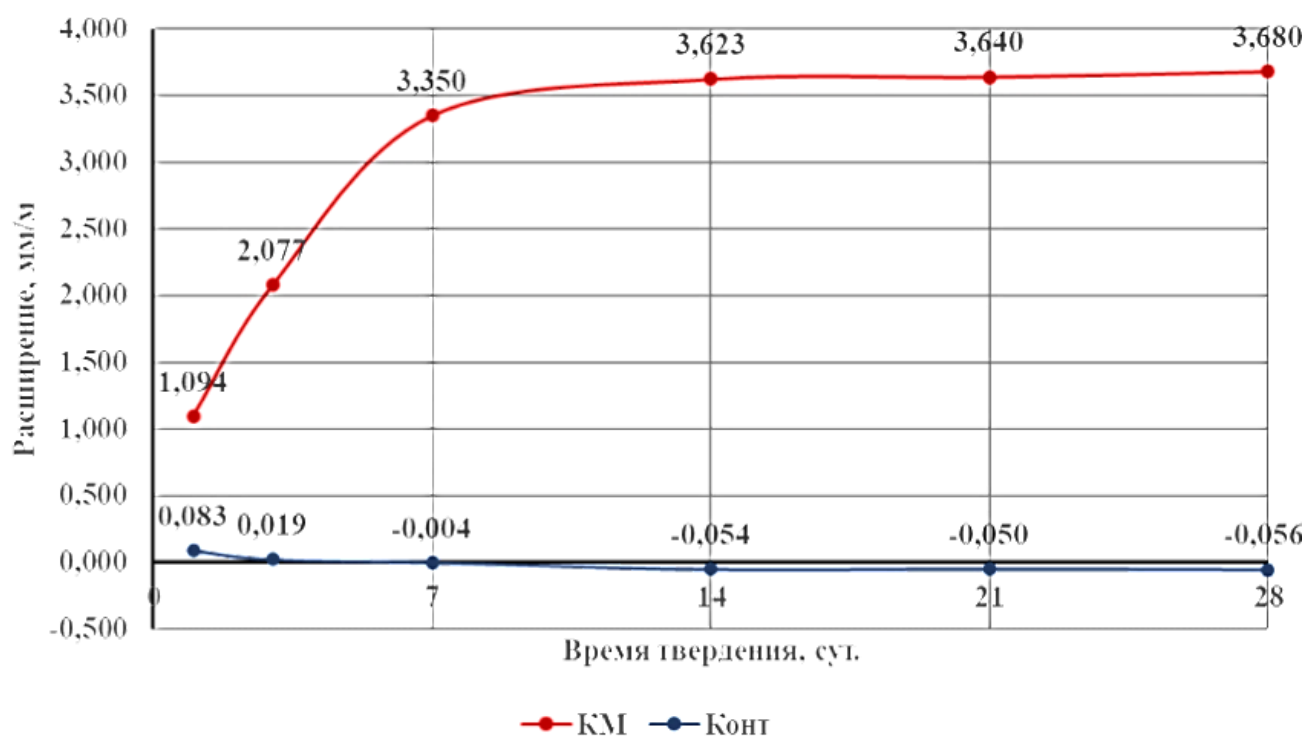


Рисунок 2 – Кинетика расширения образцов композиционного материала и контрольного портландцемента

Согласно полученным данным прочность в одни сутки у композиционного материала на 26 % выше, чем у бездобавочного состава, но при дальнейшем твердении прирост ее отстает от прочности бездобавочного портландцемента в трех- и семисуточном возрасте и приближается к прочности контрольного образца только в 28 сут. Такое замедление роста прочности у композиционного

материала обусловлено ростом расширения твердеющей системы до семи суток с последующей стабилизацией этой величины. У контрольных образцов портландцемента фиксируется усадка, что обуславливает более интенсивное нарастание прочности (рисунок 2).

Микроструктура цементного камня и продукты гидратации исследуемых составов в возрасте 28 сут. изучали с помощью электронной сканирующей микроскопии. Полученные данные представлены на рисунке 3.

Как видно из представленных результатов, в структуре затвердевшей цементной пасты композиционного материала развиваются кристаллы этtringита, на фотографии видны как игольчатые и призматические кристаллы. Помимо этого, фиксируются высокоосновные и низкоосновные гидросиликаты кальция, которые формируют плотную структуру.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным результатам, использование в составе композиционного вяжущего добавок различной природы и различного действия приводит к направленному формированию кристаллизационной структуры в твердеющей цементной пасте в начальный момент в сочетании с развивающейся коагуляционной структурой в сформированном каркасе, что улучшает структуру цементной пасты.

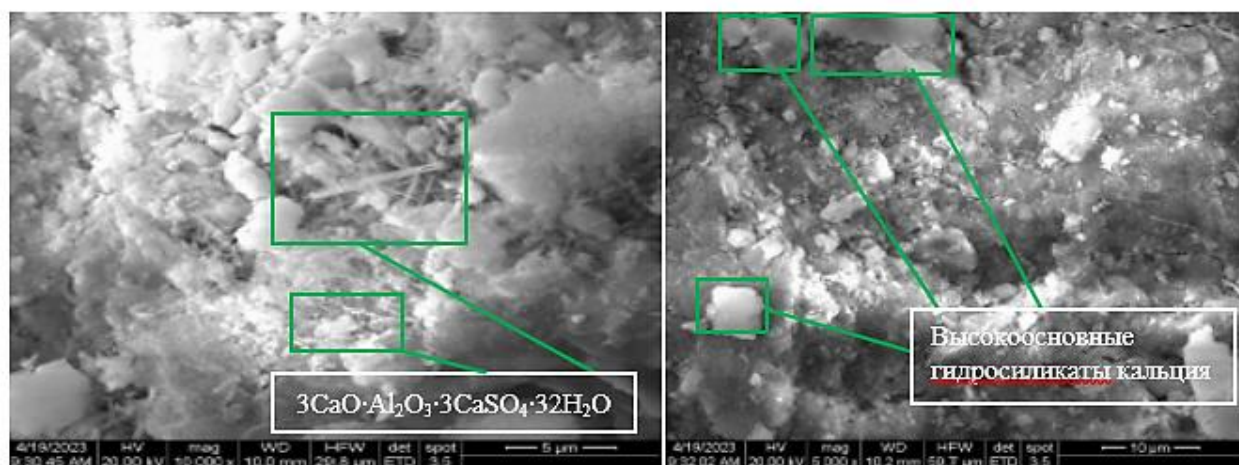


Рисунок 3 – Электронные микрофотографии затвердевшей цементной пасты композиционного материала в возрасте 28 сут.

Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела позволяет констатировать о получении композиционного материала с эффектом расширения.

Выводы

Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела позволяет констатировать о получении композиционного материала с эффектом расширения.

Список использованных источников

1. Кривобородов, Ю. Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение / Ю. Р. Кривобородов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 84–91.
2. Кузнецова, Т. В. Производство и применение сульфоалюминатных цемента / Т. В. Кузнецова // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 29–32.
3. Кузнецова, Т. В. Аллюминатные и сульфоаллюминатные цементы / Т. В. Кузнецова. – М. : Стройиздат, 1986. – 208 с.
4. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – М. : Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с.
5. Самченко, С. В. Влияние дисперсности расширяющегося компонента на свойства цементов / С. В. Самченко, Д. А. Зорин // Техника и технология силикатов. – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 2–7.
6. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254–257.
7. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cement / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, November 15–17, 2016. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – DOI: 10.1051/matecconf/201710603006.
8. Самченко, С. В. Роль эттрингита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С. В. Самченко ; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издат. центр. – М. : Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 154 с.
9. Самченко, С. В. Влияние суперпластификатора на морфологию кристаллов эттрингита / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 17–21.
10. Самченко, С. В. Образование и рост кристаллов эттрингита в присутствии полимерных функциональных добавок / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5, № 12. – С. 118–122.

УДК 624.15:692.115

СООРУЖЕНИЕ ЦЕМЕНТНО-ГРУНТОВЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Н. Г. Серегин

*К. т. н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства,
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия, e-mail:
SereginNG@mgsu.ru*