

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА «МИКРОКРЕМНЕЗЕМ–СУПЕРПЛАСТИФИКАТОР» НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

И.М. Иванов¹, Л.Я. Крамар¹, А.А. Курсанова¹, В. Тьеру²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² École des Mines de Douai, France, Douai

Изучены и дополнены особенности гидратации и твердения цементных систем высокофункциональных бетонов при помощи метода калориметрии. По результатам исследования определено влияние комплексных добавок на основе микрокремнезема и суперпластификаторов на процессы формирования структуры и свойств цементного камня. В исследовании применяли электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, дериватографию, калориметрию и физико-механические методы анализа свойств цементного камня. Установлено, что суперпластификаторы, помимо реологических и водоредуцирующих свойств, проявляют функции регуляторов схватывания и твердения цемента, а поликарбоксилатные суперпластификаторы способствуют формированию особенной, аморфизированной микроструктуры цементного камня. Так, поликарбоксилатный суперпластификатор в комплексе с микрокремнеземом способствует формированию структуры цементного камня, состоящей преимущественно из слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция. Такая структура способна сопротивляться циклическому замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высушиванию и даже циклическому нагружению, что очень важно для дорожных бетонов.

Ключевые слова: гидратация, твердение, структура цементного камня, микрокремнезем, суперпластификатор, низкоосновные гидросиликаты кальция, слабозакристаллизованные гидраты, долговечность, дорожный бетон, высокофункциональный бетон.

Введение

Разработка и внедрение в производство высокофункциональных и долговечных бетонов является одним из основных направлений научно-технического прогресса в сфере строительства [1–3]. Речь идет в первую очередь о дорожных бетонах, применяемых при строительстве автомобильных дорог, высокоскоростных ЖД магистралей, мостов, эстакад, развязок, туннелей и т.д. Такие бетоны должны отвечать высоким требованиям по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, сульфатостойкости и, как следствие, долговечности [1]. Современные тенденции развития технологии вяжущих веществ и бетонов на их основе характеризуются усложнением композиций применяемых материалов и добавок для получения изделий с высокими эксплуатационными характеристиками [3–7]. В связи с этим разработка высокофункциональных бетонов требует максимально глубокого понимания механизмов гидратационного твердения, которые могут быть существенно дополнены методом калориметрии [8–11].

Цель работы – изучить и дополнить методом калориметрии особенности гидратации и твердения цементных систем высокофункциональных бетонов.

Задачи:

– определить влияние микрокремнезема и комплексов микрокремнезем (МК) + суперпластификатор (СП) на тепловыделение, гидратацию, твердение, формирование структуры и свойств цементного камня;

– провести интерпретацию и сравнение наблюдаемых показателей тепловыделения с другими характеристиками процессов с привлечением комплексных методов анализа фазовых и структурных превращений, а также с использованием основных положений и законов термодинамики и химической кинетики.

Материалы и методы исследования

Для исследования применяли следующие исходные материалы:

- цемент ПЦ 500 Д-0, среднеалюминатный, ООО «Дюккерхофф Коркино цемент» ЦЕМ I 42,5 Н в соответствии с ГОСТ 31108-2016 [12], НГ 27,9 %;
- суперпластификатор поликарбоксилатный Glenium ACE 430, концерн BASF (Германия);
- суперпластификатор нафталинформальдегидный СП-1, ООО «Полипласт УралСиб», г. Первоуральск;

– микрокремнезем МК-85 г. Новокузнецк, в соответствии с ТУ 5743-048-02495332-96 «Микрокремнезем конденсированный. Технические условия», с пуццолановой активностью 1575 мг/г.

Исследование влияния добавок на процессы тепловыделения изучали с помощью 8-канального изотермического калориметра «ТАМ Air» при постоянной температуре внутри изотермического канала равной $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Для оценки набора прочности при сжатии цементного камня в процессе твердения были изготовлены образцы-кубики с размером граней 2 см, испытания проводили согласно пунктам 7.1 и 7.2 ГОСТ 10180-2012 [13]. Образцы цементного камня при В/Ц = 0,3 изготавливали без добавок, с добавкой МК (8 % от массы цемента) и МК с суперпластификаторами (1 % от массы цемента). Образцы твердели до 28 суток при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности $95 \pm 5\%$.

Для изучения влияния добавок на фазовый состав цементного камня применяли дериватографический анализ (ДТА), который был выполнен на дериватографе системы «Luxx STA 409» фирмы «Netsch». Пробы цементного камня, отбираемые для исследований, предварительно обрабатывали этиловым спиртом, затем высушивали при 50°C и хранили при этой же температуре до испытаний. Это способствовало почти полному исключению дальнейшей гидратации и карбонизации цементного камня [14].

Рентгенофазовый анализ (РФА) применяли для исследования фазового состава цементного камня и определения степени гидратации цемента. Съёмку вели на дифрактометре ДРОН-3, модернизированном приставкой PDWin, в интервале углов $6-70^\circ$, при напряжении 30 кВт, силе тока 20 мА и ширине выходной щели 1 мм. Степень гидратации цементного камня определяли согласно методике внутреннего стандарта Ю.С. Малинина [14, 15] по изменению интенсивности аналитических линий минералов клинкера C_3S – $1,77 \text{ \AA}$ и $\beta\text{-C}_2\text{S}$ – $2,86 \text{ \AA}$, в качестве внутреннего стандарта использовали отражение флюорита (CaF_2) – $1,64 \text{ \AA}$, точность определения 5 %.

Степень гидратации α рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{\beta - \gamma}{\beta} \times 100 \%,$$

где β – площадь аналитических линий для исходного цемента, импульс ·град./с; γ – площадь аналитических линий рассматриваемой прогидратированной цементной системы, имп · град./с.

Для исследования в электронном микроскопе образцов цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения были изготовлены шлифы. Шлифы позволяют провести более достоверную оценку структуры цементного камня, так как по-

зволяют учитывать как слабые, так и сильные участки цементного камня.

Результаты исследований

В данной работе проводится изучение процессов гидратации и твердения цементных систем с микрокремнеземом как в присутствии суперпластификаторов, так и без них.

Калориметрический анализ

Процессы смачивания, адсорбции и гидролиза цементных минералов, а далее индукционный период гидратации цемента с различными суперпластификаторами при В/Ц 0,5 и 0,3 изучены ранее [16]. В настоящей работе эти этапы гидратации цемента и цементных систем с микрокремнеземом носят аналогичный характер, а период ускоренной гидратации заслуживает особого внимания.

Представленный на рис. 1 тепловой поток, зафиксированный при гидратации цемента в течение индукционного и ускоренного периода в зависимости от времени и вводимых добавок, позволяет выявить следующее.

Введение МК как с СП, так и без них значительно увеличивает тепловой поток (рис. 1) и ускоряет гидратационные процессы. Известно, что микрокремнезем вступает в пуццолановую реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образует низкоосновные гидросиликаты кальция (ГСК) [17–19]. В результате этого концентрация ионов кальция и pH среды падает, а гидролитическое разложение C_3S по принципу Ле Шателье протекает дальше – в сторону компенсации внешнего воздействия. Это повышает степень гидратации в ранние сроки, а также способствует формированию преимущественно низкоосновных гидратных фаз типа C-S-H (I).

После стадии активной гидратации составы с микрокремнеземом отличаются от других пониженным тепловыделением (рис. 1, после 40 часов). Это связано с меньшим содержанием или отсутствием метастабильных гидратных фаз, которые склонны к перекристаллизации в этот период.

Тепловая энергия гидратации, полученная интегрированием теплового потока (рис. 1) по времени, представлена на рис. 2. Из полученных зависимостей хорошо видно, что МК в первые двое суток увеличивает тепловыделение, что свидетельствует об ускорении гидратации цемента.

Тепловая энергия гидратации и твердения, зафиксированная через 180 часов, показывает минимальные значения для составов с МК (рис. 2). Это объясняется тем, что МК способствует образованию низкоосновных гидратных фаз, а они, как известно [20, 21], формируются с пониженной тепловой энергией.

Оценка физических показателей

На рис. 3 представлен предел прочности при сжатии цементного камня с различными добавками в возрасте 1, 2, 3, 7 и 28 суток твердения.

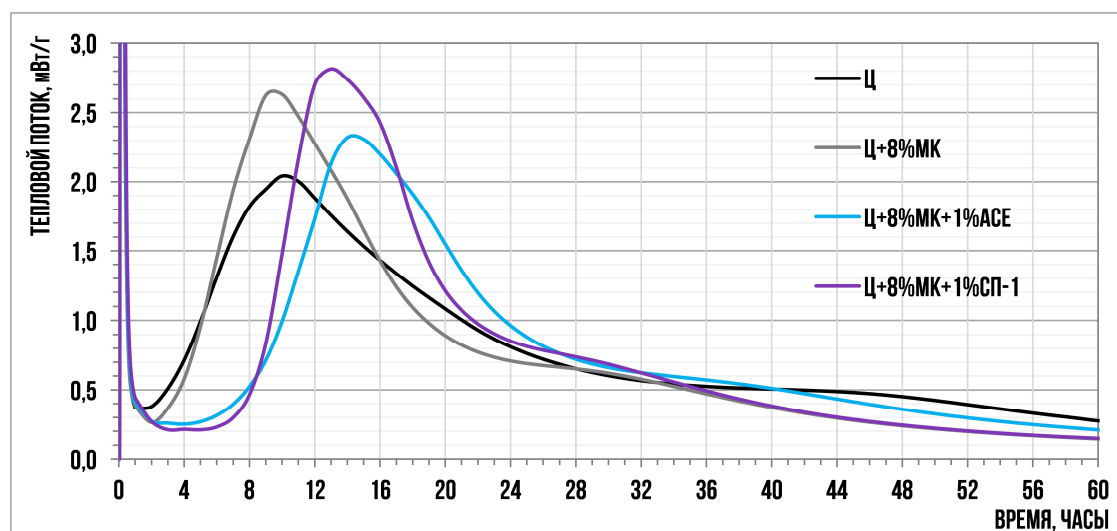


Рис. 1. Тепловой поток за индукционный и ускоренный периоды гидратации цемента в зависимости от времени и вводимых добавок

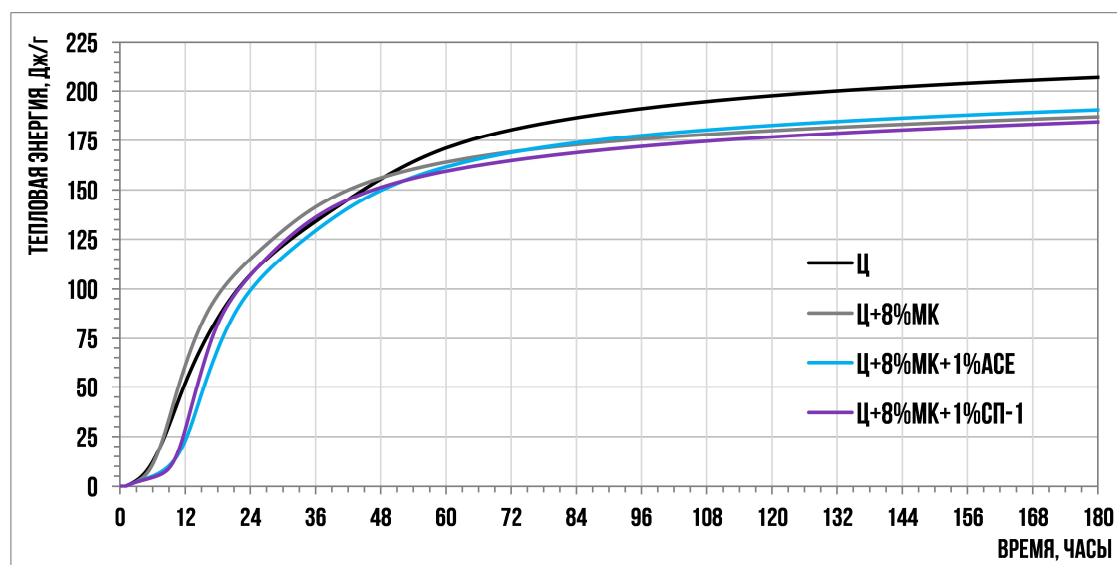


Рис. 2. Тепловая энергия гидратации цемента в зависимости от времени и вводимых добавок

Составы с МК в 1 сутки твердения отличаются повышенной прочностью (рис. 3), вследствие ускорения гидратационных процессов, что подтверждается повышенным тепловыделением (рис. 1 и 2) в этот период. По сравнению с бездобавочным составом цементный камень с комплексной добавкой МК + СП демонстрирует повышенную прочность (рис. 3), особенно с применением поликарбоксилатного суперпластификатора.

Для оценки пористости цементного камня было проведено испытание образцов на водопоглощение в 1, 2, 3, 7 и 28 суток. Водопоглощение по массе как характеристика открытой пористости представлено на рис. 4.

Водопоглощение по массе у составов цементного камня с МК уже в 1 сутки имеет пониженные показатели по сравнению с бездобавочным составом.

Это подтверждает предположение о том, что в присутствии МК процессы гидратации ускоряются.

Составы с МК дают низкие показатели по водопоглощению (рис. 4), особенно с применением поликарбоксилатного суперпластификатора. Это подтверждает ранее выявленные сведения [7] о том, что поликарбоксилатный СП (Glenium ACE 430) в сравнении с нафталиноформальдегидным СП (СП-1) формирует более плотную, состоящую из слабозакристаллизованных гидратных фаз, структуру цементного камня.

Важно отметить, что у бездобавочного состава наблюдается увеличение водопоглощения к двум суткам, а у составов Ц + МК и Ц + МК + СП-1 к трем. Это может быть связано с контракционной усадкой цементного камня в ранние сроки тверде-

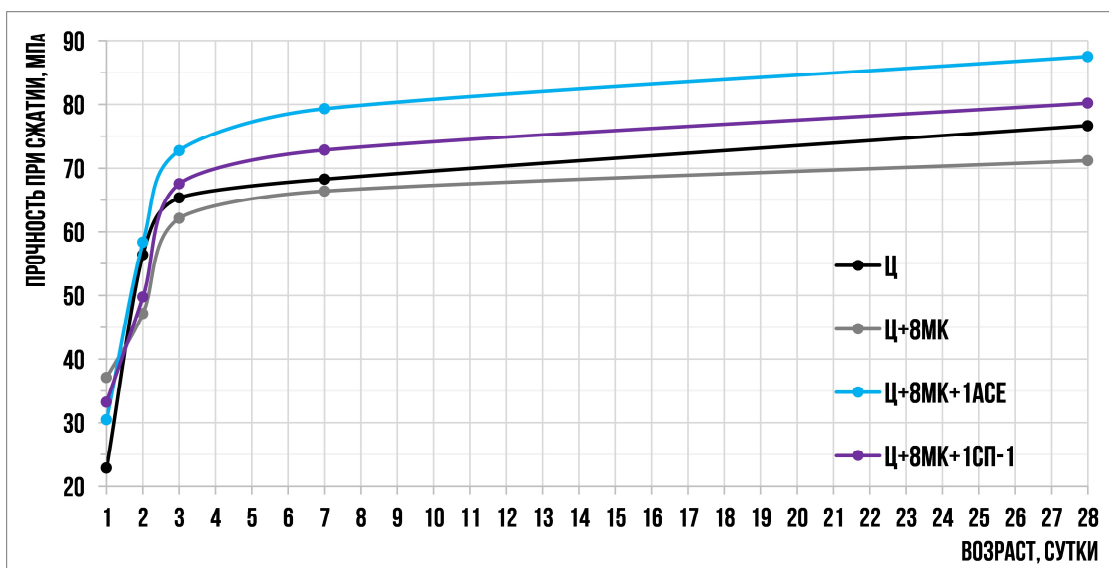


Рис. 3. Прочность при сжатии в зависимости от сроков твердения и вводимых добавок

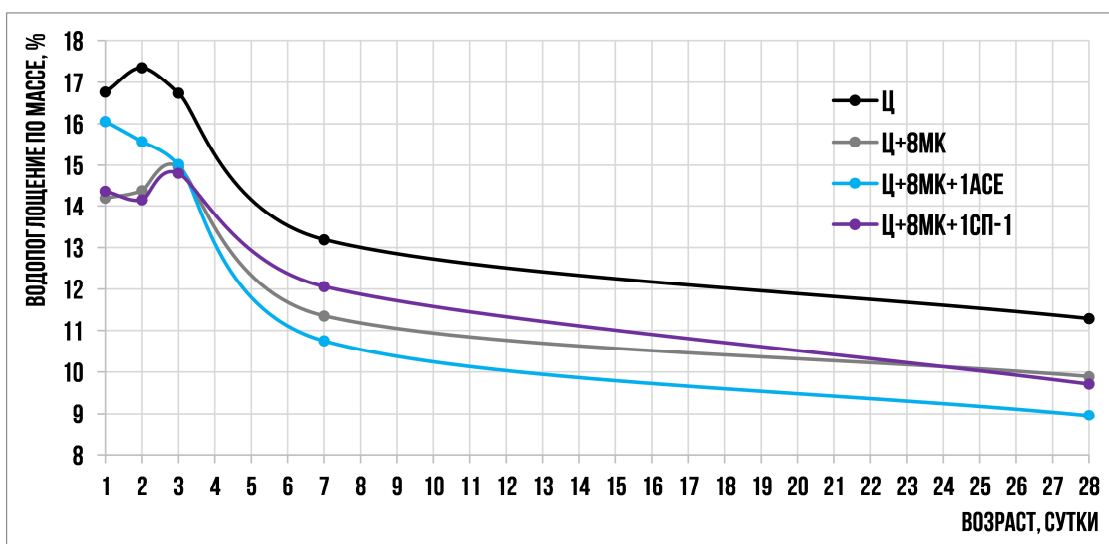


Рис. 4. Водопоглощение по массе в зависимости от сроков твердения и вводимых добавок

ния и повышением вследствие этого его открытой пористости. Цементный камень с добавкой МК + АСЕ отличается от других тем, что его гидратация и твердение происходит без увеличения водопоглощения в ранние сроки твердения. Это, вероятно, связано с тем, что поликарбоксилатные суперпластификаторы способствуют снижению контрактной усадки, а это может положительно отражаться на прочности, водонепроницаемости и морозостойкости бетона.

Оценка фазового состава цементного камня

Содержание портландита в цементном камне с различными добавками в возрасте 7 и 28 суток представлено на рис. 5, а. Из полученных результатов следует, что составы цементного камня с МК имеют пониженное содержание портландита (рис.

5, а). Это свидетельствует о достаточно высокой пуццолановой активности добавки.

Содержание химически связанной воды (рис. 5, б) может косвенно отражать степень гидратации цемента. Для убедительности результатов был проведен анализ степени гидратации при помощи сравнительного количественного рентгенофазового анализа исходного цемента и рассматриваемых прогидратированных образцов по методу Ю.С. Малинина. Результаты расчетов представлены на рис. 5, в. В данном случае степень гидратации (рис. 5, в) хорошо коррелирует с содержанием химически связанной воды (рис. 5, б). По этим данным четко видно, что микрокремнезем повышает степень гидратации цемента к 7 и 28 суткам твердения и в большей степени с применением поликарбоксилатного суперпластификатора.

Электронная микроскопия

Снимки в электронном микроскопе основных составов при увеличении в 3, 5 и 10 тысяч раз представлены на рис. 6. Описание наблюдаемой структуры образцов цементного камня с помощью электронного микроскопа приведено в таблице.

Заключение

По результатам исследования можно выделить следующие основные закономерности.

Введение микрокремнезема как с суперпластификаторами, так и без них приводит к:

– ускорению гидратационных процессов;

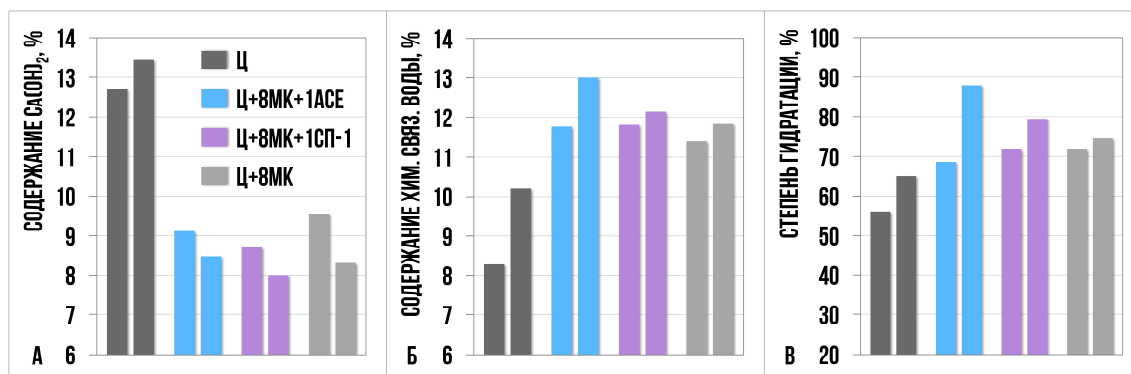


Рис. 5. Содержание портландита (А), химически связанной воды (Б) и степень гидратации (В) в возрасте 7 и 28 суток соответственно

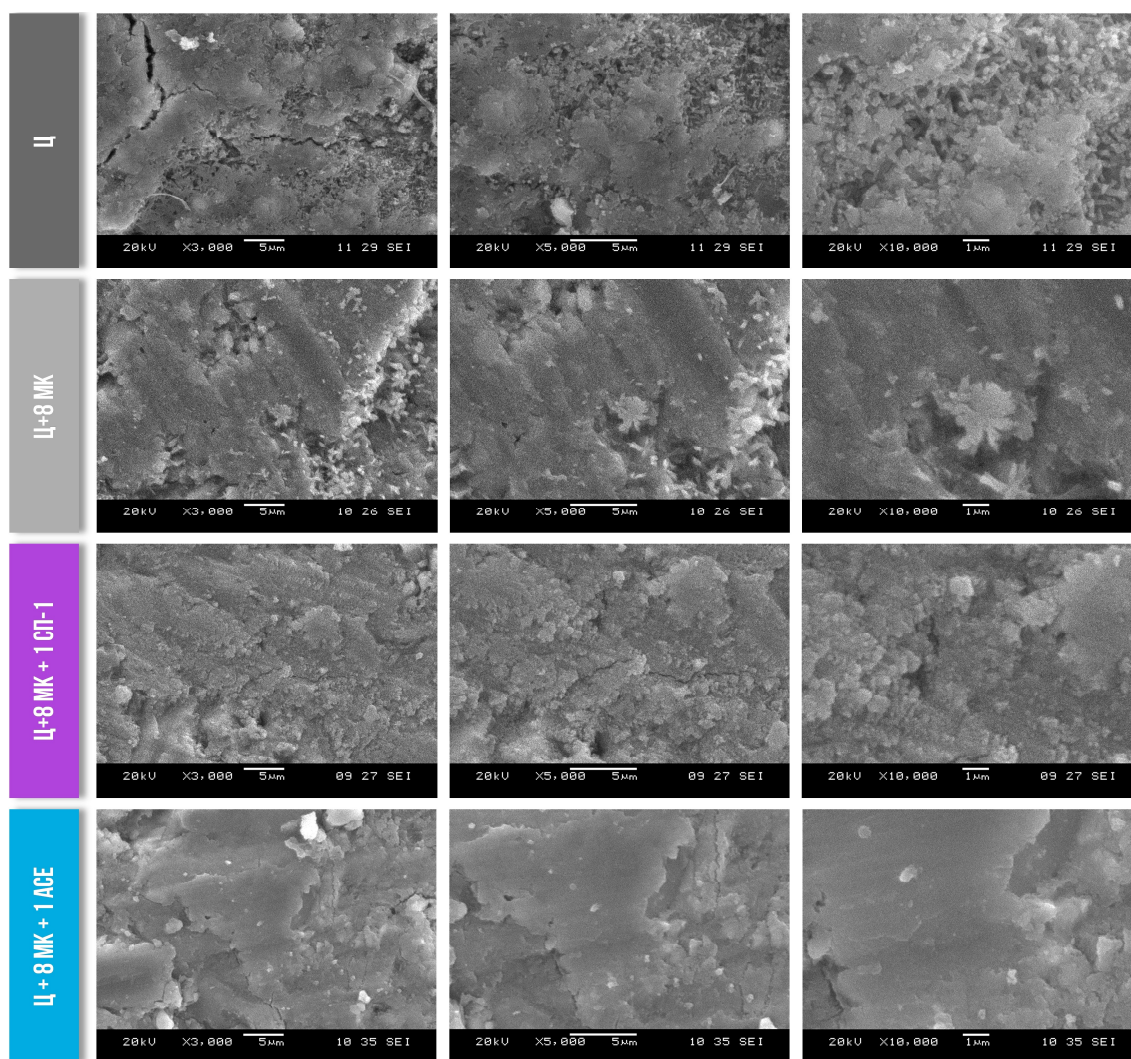


Рис. 6. Снимки с электронного микроскопа при увеличении в 3, 5 и 10 тысяч раз

Сравнительная характеристика снимков цементного камня в электронном микроскопе

Состав	Характеристика структуры
Ц (без добавок)	Встречаются как аморфные, так и рыхлые – хорошо закристаллизованные участки
Ц + 8 % МК	Структура в основном представлена аморфными образованиями из низкоосновных ГСК, включающими зародыши кристаллических фаз и локальные скопления портландита
Ц + 8 % МК+ 1 % СП-1	Гидратные фазы аморфизированные, но содержат множество кристаллических микрообразований.
Ц + 8 % МК+ 1 % АСЕ	Структура почти полностью сформирована слабо закристаллизованными (аморфизированными) низкоосновными ГСК

- увеличению степени гидратации цемента;
- снижению тепловой энергии гидратации и твердения за счет формирования низкоосновных ГСК;

- снижению водопоглощения цементного камня;

- формированию цементного камня преимущественно из низкоосновных ГСК и снижению перекристаллизационной активности после ускоренного периода гидратации.

Поликарбоксилатный суперпластификатор в комплексе с микрокремнеземом способствует:

- высокой пластификации;
- снижению водопоглощения и усадки цементного камня;

- повышению степени гидратации при оптимальных дозировках;

- формированию цементного камня преимущественно из слабозакристаллизованных (аморфизированных) низкоосновных ГСК.

При помощи калориметрических исследований удалось установить, что пластифицирующие добавки проявляют свойства регуляторов схватывания и твердения. Поликарбоксилатные суперпластификаторы дополнительно способствуют формированию аморфизированной, устойчивой к кристаллизации микроструктуры цементного камня. Комплекс поликарбоксилатный СП + МК повышает прочность и обеспечивает резкое снижение капиллярной пористости, ответственной за плотность, проницаемость, стойкость, а значит и долговечность бетона. Эта комплексная добавка позволяет получить цементный камень преимущественно из слабозакристаллизованных (аморфизированных) низкоосновных ГСК, которые более стойки к различным циклическим воздействиям, таким как замораживание и оттаивание, увлажнение и высушивание, а также переменные механические нагрузки. Все это является весомым аргументом в пользу применения микрокремнезема совместно с поликарбоксилатным суперпластификатором в бетонах, которые эксплуатируются в различных агрессивных условиях.

Литература

1. Баженов, Ю.М. *Технология бетона: учеб. пособие для вузов* / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.

2. Берг, О.Я. *Высокопрочный бетон: учеб. пособие для строит. вузов* / О.Я. Берг. – М.: Высшая школа, 1971. – 214 с.

3. Aitcin, P.C. *High-Performance Concrete* / P.C Aitcin. – Quebec: E & Fn Spon, 1998. – 364 p.

4. Каприелов, С.С. *Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива* / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // *Бетон и железобетон*. – 1999. – № 4. – С. 6–10.

5. Калашиников, В.И. *Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения* / В.И. Калашиников // *Бетон и железобетон*. – 2012. – Т. 6, № 1. – С. 82–89.

6. Shuldyakov, K. *Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance* / K. Shuldyakov, L. Kramar, B. Trofimov, I. Ivanov // *Advanced materials in technology and construction (AMTC-2015)*. – 2016. – P. 070011-1–070011-6.

7. Шулдяков, К.В. *Особенности влияния пластификатора на структуру цементного камня и свойства бетона* / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, И.М. Иванов // *Перспективные материалы в технике и строительстве: материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием (ПМТС-2015)* – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – С. 423–426.

8. *Актуальные аспекты практического применения методов калориметрии при изучении кинетики гидратации вяжущих в строительном материаловедении* / А.О. Адамцевич и др. // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании*. – М.: Изд-во МГСУ, 2012. – С. 354–360.

9. Гуревич, В.М. *Метод калориметрического исследования гидратации цемента* / В.М. Гуревич, А.И. Марков // *Цемент*. – 1987. – № 12. – С. 20–21.

10. Мчедлов-Петросян, О.П. *Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетона* /

О.П. Мчедлов-Петросян, А.В. Ушеров-Маршак, А.М. Урженко. – М.: Стройиздат, 1984. – 224 с.

11. Хеммингер, В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене. – М.: Химия, 1990. – 176 с.

12. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

13. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 35 с.

14. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.

15. Методы исследования цементного камня и бетона / под ред. З.М. Ларионовой. – М.: НИИЖБ, Стройиздат, 1970. – 159 с.

16. Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента / И.М. Иванов, Д.В. Матвеев, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар //

Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 42–49.

17. Крамар, Л.Я. Оптимизация структуры и свойств цементного камня и бетона введением тонкодисперсной добавки активного кремнезема: дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1989. – 193 с.

18. Гамалий, Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона: дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2009. – 217 с.

19. Умемур, И. Влияние микрокремнезема и суперпластификатора на гидратацию цемента при низком водоцементном отношении / И. Умемур, М. Сату, К. Коизуми, Н. Цуюки // Цемент и его применение. – 2013. – № 4. – С. 134–138.

20. Тейлор, Х. Химия цемента / Хел Тейлор; пер. с англ. – СПб.: Мир, 1996. – 560 с.

21. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.

Иванов Илья Михайлович, аспирант кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivanov.im@bk.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramar-l@mail.ru

Кирсанова Алёна Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и изделий, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kiss421@mail.ru

Тьерри Винсент, PhD, доцент кафедры гражданского строительства и окружающей среды, Школа минералогии (Дуэ, Франция) vincent_thiery@hotmail.fr

Поступила в редакцию 5 декабря 2017 г.

DOI: 10.14529/build180102

INFLUENCE OF THE MICROSILICA-SUPERPLASTICIZER COMPLEX ON FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF CEMENT STONE

I.M. Ivanov¹, ivanov.im@bk.ru

L.Ya. Kramar¹, kramar-l@mail.ru.

A.A. Kirsanova¹, kiss421@mail.ru

V. Thiery², vincent_thiery@hotmail.fr

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² Ecole des Mines, Douai, France

The features of hydration and hardening of cement systems of high performance concretes with the use of calorimetric measurement method have been studied and supplemented. Based on the results of the study, the influence of complex additives based on microsilica and superplasticizers on the processes of formation of the structure and properties of cement stone was determined. Electronic microscopy, X-ray phase analysis, derivatography, calorimetry and physical-mechanical methods for analyzing the properties of cement stone were used for the studies. It was

established that superplasticizers, in addition to rheological and water-reducing properties, reveal the functions as regulators of setting and hardening of cement, and polycarboxylate superplasticizers contribute to the formation of a special, amorphized microstructure of cement stone. Thus, the polycarboxylate superplasticizer in combination with microsilica favors the formation of a cement stone structure consisting mainly of weakly crystallized low-basic calcium hydrosilicates. This structure is able to resist cyclic freezing and thawing, moistening and drying and even cyclic loading, which is very important for road concretes.

Keywords: hydration, hardening, cement stone structure, microsilica, superplasticizer, low-basic calcium hydrosilicates, weakly crystallized hydrates, durability, road concrete, high-performance concrete.

References

1. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona: ucheb. posobie dlya vuzov* [The Technology of Concrete: Textbook for High Schools]. Moscow, ASV Publ., 2007. 528 p.
2. Berg O.Ya. *Vysokoprochnyy beton: ucheb. posobie dlya stroit. vuzov* [High-Strength Concrete: Textbook for Construction Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 214 p.
3. Aitcin P.C. [High-Performance Concrete]. Quebec Publ., 2004. 364 p.
4. Kaprielov S.S., Batrakov V.G., Sheynfel'd A.V. [New-Generation Modified Concrete: Reality and Perspective]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 1999, no. 4, pp. 6–10 (in Russ.).
5. Kalashnikov V.I. [How to Turn Old-Fashioned Concrete into High-Performance Concrete of a New Generation]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2012, vol. 6, no. 1. pp. 82–89 (in Russ.).
6. Shuldyakov K., Kramar L., Trofimov B., Ivanov I. [Superplasticizer Effect on Cement Paste Structure and Concrete Freeze-thaw Resistance]. *Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015)*, AIP Publishing, 2016, pp. 070011-1- 070011-6.
7. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Ivanov I.M. [Features of the Influence of Plasticizer on the Structure of Cement Stone and the Properties of Concrete]. *Perspektivnye materialy v tekhnike i stroitel'stve: materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchennykh s mezhdunarodnym uchastiem (PMTS-2015)* [Perspective Materials in Engineering and Construction: Works of the 2nd Russian International Scientific Conference of Young Scientists (PMTS-2015)]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2015. pp. 423–426 (in Russ.).
8. Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P., Solov'ev V.G., Pashkevich S.A. [Actual Aspects of the Practical Application of Calorimetry Methods in Studying the Kinetics of Hydration of Binders in Construction Materials]. *Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii* [Integration, Partnership and Innovations in Construction and Education]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2012, pp. 354–360 (in Russ.).
9. Gurevich V.M., Markov A.I. [Method of Calorimetric Study of Cement Hydration]. *Tsement* [Cement], 1987, no. 12. pp. 20–21 (in Russ.).
10. Mchedlov-Petrosyan O.P., Usharov-Marshak A.V., Urzhenko A.M. *Teplovydelenie pri tverdenii vyazhushchikh veshchestv i betona* [Heat Emission during Hardening of Binders and Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 224 p.
11. Khemminger V., Khene G. *Kalorimetriya. Teoriya i praktika*. [Calorimetry. Theory and Practice]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 176 p.
12. GOST 31108-2016. *Tsementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya* [Common Cements. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.
13. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nykh obraztsam* [Concretes. Methods for Strength Determination Using Reference Specimens]. Moscow, Standartinform Publ., 2013.
14. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of Physico-Chemical Analysis of Binders]. Moscow, High school Publ., 1981. 335 p.
15. Larionova Z.M. *Metody issledovaniya tsementnogo kamnya i betona*. [Methods for Studying Cement Stone and Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970. 159 p.
16. Ivanov I.M., Matveev D.V., Orlov A.A., Kramar L.Ya. [Influence of Water-Cement Ratio and Superplasticizers on the Heat Release, Cement Hydration, and Hardening Processes]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Building and Architecture*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 42–49.
17. Kramar L.Ya. *Optimizatsiya struktury i svoystv cementnogo kamnya i betona vvedeniem tonkodispersnoy dobavki aktivnogo kremnezema*. Dis. dok. tekhn. nauk [Optimization of the Structure and Properties of Cement Stone and Concrete by Introducing a Finely Dispersed Active Silica Additive. Doc. sci. diss.]. Chelyabinsk, Chelyabinsk Polytechnical Inst. Publ., 1989. 193 p.

18. Gamaliy E.A. *Kompleksnye modifikatory na osnove efirov polikarboksilatov i aktivnykh mineral'nykh dobavok dlya tyazhelogo konstruktivnogo betona*. Dis. kand. tekhn. nauk [Complex Modifiers Based on Esters of Polycarboxylates and Active Mineral Additives for Heavy Structural Concrete. Cand. sci. diss], Chelyabinsk, 2009. 217 p.
19. Umemura I. [Influence of Microsilica and Superplasticizer on Cement Hydration at Low Water-Cement Ratio]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its implementation], 2013, no. 4, pp. 134–138 (in Russ.).
20. Teylor Kh. *Khimiya tsementa* [Chemistry of Cement.]. Moscow, Mir Publ., 1996. 560 p.
21. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical Technology of Binders]. Moscow, 1980. 472 p.

Received 5 December 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние комплекса «микрокремнезем – суперпластификатор» на формирование структуры и свойств цементного камня / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар, А.А. Кирсанова, В. Тьеры // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 32–40. DOI: 10.14529/build180102

FOR CITATION

Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Kirsanova A.A., Thiery V. Influence of the Microsilica-Superplasticizer Complex on Formation of Structure and Properties of Cement Stone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2018, vol. 18, no. 1, pp. 32–40. (in Russ.). DOI: 10.14529/build180102
