DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-5-13

*Череватова А.В., доктор технических наук, профессор,
Жерновская И.В., старший преподаватель,
Алехин Д.А., аспирант,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия,
Кожухова М.И., кандидат технических наук, научный сотрудник,
Университет Висконсин-Милуоки, США,
Кожухова Н.И. *, кандидат технических наук, доцент,
Яковлев Е.А., кандидат технических наук, доцент,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия*
*Ответственный автор E-mail: kozuhovanata@yandex.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО ПОВЫШЕННОЙ ЖАРОСТОЙКОСТИ

Аннотация: среди широкого спектра вяжущих продуктов строительного назначения, наибольший интерес проявляется к бесцементным вяжущим нового поколения, для которых свойственны уникальные или улучшенные эксплуатационные характеристики. Среди подобных вяжущих следует отметить относительно новый вид вяжущего – композиционное наноструктурированное гипсовое вяжущее (КНГВ). В рамках данной статьи рассмотрена и апробирована гипотеза о синергетическом эффекте в твердеющей системе, который реализуется при взаимодействии двух вяжущих систем принципиально разного механизма твердения: полимеризационно-поликонденсационный и гидратационный. Проведен ряд исследований, на основании которых представлены результаты, подтверждающие устойчивость КНГВ к воздействию высоких (до 1000 °C) температур по сравнению с традиционной гипсовой вяжущей системой. Установлено, что термостойкость КНГВ обоснована протеканием кристаллизационных процессов с участием кремнеземной составляющей, при применении наноструктурированного вяжущего в качестве активного минерального компонента, который, в свою очередь, характеризуется устойчивостью к воздействию повышенных температур. Как проявление синергетического эффекта, в процессе взаимодействия двух вяжущих компонентов происходит образование кристаллического продукта типа гидроксизеллестадита $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$, размеры элементарных ячеек которого при перепадах температур в широком диапазоне практически не изменяются. Это свойство данной кристаллической фазы позволяет сохранить целостность сформировавшейся структуры композиционного вяжущего КНГВ.

Ключевые слова: наноструктурированное вяжущее, гипсовое вяжущее, композиционное вяжущее, синергетический эффект, механизмы формирования структуры, гидроксизеллестадит

Введение

На современном строительном рынке наблюдается тенденция непрерывного увеличения ассортимента вяжущих продуктов.

Прежде всего, это связано с тем, что основной причиной разработки и дальнейшего внедрения того или иного вяжущего продукта является потребность рынка в расширении и ужесточении требований к эксплуатационным свойствам материала для обеспечения его конкурентоспособности на мировом уровне. Другими словами, создание новой, ранее неизвестной вяжущей системы должно быть обосновано улучшением каких-либо эксплуатационных характеристик или обнаружением принципиально новых.

Известно, что процессы и условия структурообразования существенно образом зависят от компонентного состава вяжущего материала и частично или принципиально отличаются между собой. При этом широко применяемые классические вяжущие системы, такие как цементные, гипсовые, известковые и др. характеризуются высокой степенью изученности с точки зрения формирования структуры и фазообразования в зависимости от различных факторов влияния [1-6]. Поэтому для данной категории вяжущих в настоящее время разработаны технологии получения, а также определены основные области применения с учетом их эксплуатационных характеристик.

В то же время, новые [7-12], в том числе композиционные вяжущие характеризуются слабой изученностью и поверхностным пониманием процессов, происходящих в системе при их фазо- и структурообразовании, а также причинно-следственных связей их поведения в процессе эксплуатации.

Это, в свою очередь, создает определенные ограничения по их синтезу и дальнейшему применению.

В связи с этим, необходимо применение современных технологических подходов, позволяющих управ-

лять структурообразованием на микро- и наноуровне для создания эффективных бесцементных композиционных гипсовых вяжущих и материалов на их основе, способных активно сопротивляться температурному воздействию и имеющих более широкий спектр областей практической реализации.

Среди новых и многообещающих строительных материалов с полной уверенностью можно выделить наноструктурированные вяжущие, которые с точки зрения структурообразования относятся к вяжущим с негидратационным типом твердения. Благодаря своим свойствам, эти материалы являются потенциальным сырьевым источником для синтеза материалов общестроительного назначения или в сферах специальной направленности. Согласно ранее сложившимся представлениям, наноструктурированное вяжущее (НВ) – это неорганическая вяжущая система полидисперсного и полиминерального состава, как правило, характеризующаяся преобладающим содержанием силикатных и/или алюмосиликатных оксидов. Кроме того, в составе этой вяжущей системы средняя реакционно активной твердой фазы в виде наноразмерного компонента составляет 3-10% [13-17].

Энергосберегающий аспект и «зеленая» технология синтеза НВ, практически неограниченный срок его хранения, а также широкий температурный интервал эксплуатации свидетельствуют об очевидных достоинствах данного вяжущего [13].

Ранее авторами данной статьи было разработано композиционное наноструктурированное гипсово-кремнеземистое вяжущее (КНГВ), характеризующееся жаростойкостью в условиях повышенной температуры в сравнении с аналогами гипсовой системы [18, 19].

Было установлено, что взаимодействие полуводного гипса, при его гидратации, с коллоидным раствором кремнезема (фазовый компонент наноструктурированного вяжущего НВ) приводит к образованию промежуточных кальциевосульфосиликатных кристаллических фазовых образований, в частности, гидроксизеллестадита – $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$, обеспечивающих формирование структурно-связанных кристаллических контактов между минеральными индивидами двуводного гипса и α -кварца. Образование $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$, подтверждено результатами полнопрофильного рентгено-фазового анализа и ИК-спектроскопией [20].

Существует довольно достоверное утверждение о том, что появление так называемых «эмерджентных» свойств композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего (КНГВ) (т.е. не свойственных компонентам системы) проявляется за счет формирования оптимально-структурированной матрицы системы с учетом специфики одновременного протекания в ней двух процессов структурообразования: полимеризационно-поликонденсационного и гидратационного.

Известно, что гипсовое вяжущее относится к вяжущему гидратационного типа структурообразования, что уже по его природе исключает возможность применения в условиях повышенных температур или большого температурного градиента.

Тем не менее, конечной целью данных исследований является практическое подтверждение жаростойкости композиционного гипсового вяжущего при воздействии высоких (до 1000°C) температур, обуслованной протеканием кристаллизационных процессов с участием кремнеземной составляющей, при применении наноструктурированного вяжущего в качестве активного минерального компонента.

Методы и материалы

В работе для получения КГНВ использовалось гипсовое вяжущее марки Г-5АП производства «Самарский гипсовый комбинат» г. Самара и НВ на основе кварцевого песка (Корочанское месторождение, Белгородская область).

Экспериментальные составы композиционного гипсокремнеземного вяжущего были заформованы в виде призм с габаритными размерами 160×40×40 мм. Консолидация осуществлялась в лабораторных условиях естественной влажности и при температуре 22±2°C на протяжении 120 минут. После начального твердения составы были подвержены термическому высушиванию при температуре 35°C в течении 24 часов.

Определение таких прочностных характеристик как предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, осуществлялось с использованием пресса ПГМ 100. Средний подъем скорости нагружения в процессе испытания 10±5 кг/см² в секунду.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при термических фазовых трансформациях в КГНВ, а также осуществления количественной оценки содержания кристаллических минеральных образований, использовался метод полнопрофильного РФА с применением программы DDM v.1.95d с применением ритвельдовского алгоритма [20].

Особенности формирования структуры КНГВ в условиях высокотемпературного воздействия в отличие от естественной температуры изучены с помощью микроструктурного анализа, проведенного с использо-

ванием сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия)³, работающего в режиме высокого вакуума (InBeam) с использованием катода Шоттки высокой яркости.

Результаты и обсуждения

В ходе исследований, в качестве компонента для получения КГНВ вводилось наноструктурированное SiO₂-вяжущее (НВ) в виде наноструктурированного кремнеземистого компонента (НКК) в интервале концентраций от 10 до 90 (% вес.) по сухому веществу.

Результаты испытаний эксплуатационных свойств экспериментальных составов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики КГНВ

Table 1

Physical and mechanical characteristics of composite gypsum nanostructured binder

№ п/п	Наименование показателей	Содержание НВ в КГВ, %							
		0	30	40	50	60	70	80	90
1	Предел прочности при сжатии, МПа	13,28	11,9	10,45	8,53	8,49	6,6	4,02	2,26
2	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	2,9	4,3	3,7	3,0	2,7	1,9	1,3	0,7
3	Средняя плотность, кг/м ³	1178,4	1267,9	1309,5	1331,8	1399,5	1481,4	1529,8	1651,7
4	Водогипсовое отношение	0,57	0,68	0,75	0,89	1,08	1,42	2,08	3,08

Анализ результатов прочности для образцов экспериментальных вяжущих позволил установить, что наиболее оптимальный диапазон концентраций НВ как активного минерального компонента в составе КГНВ с точки зрения прочностных показателей находится в пределах от 30 до 70%.

Следует отметить, что для оценки влияния высоких температур на структурные и, как следствие, прочностные характеристики исследуемого композиционного вяжущего КГНВ, в рамках эксперимента были синтезированы три серии образцов вяжущего КГНВ с тремя аналогичными концентрациями наноструктурированного вяжущего НВ, но подвержены термической обработке при различных температурах: 600, 800 и 1000°C. Составы были заформованы в соответствии с разработанной математической матрицей планирования эксперимента (табл. 2). Полученные результаты прочности представлены в табл. 3.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Table 2

Experiment planning matrix

№ п/п	Входные параметры		Диапазон варьирования			Шаг варьирования
	Кодированный вид	Натуральный вид	-1	0	1	
1	X1	Концентрация НВ, %	30	50	70	20
2	X2	Температура термо- обработки, °C	600	800	1000	20

Для возможности осуществления сравнительного анализа, одновременно с экспериментальными составами был заформовано чистое гипсовое вяжущее в качестве контроля.

На основании предварительного визуального анализа было выявлено, что после выдержки под действием высокой температуры, структура контроля была практически полностью разрушена, поэтому образцы этого состава не подлежат испытанию.

Согласно результатам матрицы планирования (табл. 3), повышение температуры и концентрации НВ в составе композиционного вяжущего способствует увеличению показателей прочности на сжатие. Данный феномен может быть чрезмерным насыщением композиционной системы твердофазой компонентой, а также нехваткой воды в качестве дисперсионной среды, которая принимает активное участие в реакции гидратации.

Таблица 3

Результаты эксперимента согласно матрицы планирования эксперимента

Table 3

Experiment results according to experiment planning matrix

Входные параметры		Значения предела прочности при сжатии, МПа
X1	X2	
-1	-1	4,4
0	-1	3,4
1	-1	2,3
-1	0	7,2
0	0	8,1
1	0	4,6
-1	1	7,4
0	1	14,7
1	1	14,4

Минеральный состав экспериментальных составов, полученный полнопрофильным количественным РФА, представлен в табл. 4.

На основании представленных аналитических данных о минеральном составе, следует отметить, что в составах композиционного вяжущего присутствует новообразованная кристаллическая фаза в виде гидро-сульфосиликата кальция – гидроксизеллестадита. Учитывая тот факт, что в составе контрольного образца это минеральное образование отсутствует, следует предположить, что фаза гидроксизеллестадита является продуктом реакции гидратации между компонентами гипсового вяжущего и наиболее реакционно активной (наноразмерной) составляющей НВ.

В то же время, анализируя минеральный состав КГНВ и гипсового камня после высокотемпературной обработки при температуре 1000°C, в составе композиционного вяжущего следует отметить наличие высокотемпературных модификаций типа элестадит, β-кварц, модификация двухкальциевого ортосиликата – α_L -Ca₂SiO₄.

Наиболее примечательным явлением в этом случае является стабильность структуры КГНВ при варьировании температурного воздействия от 25°C до 1000°C. С кристаллографической точки зрения это может быть объяснено тем, что изменение объема ячеек присутствующих кристаллических образований в широком диапазоне температурных преобразований практически отсутствует, т.е. отношение объемов близко к единице. Чего нельзя сказать об особенностях фазового состава для чистого гипсового камня. В данном случае высокотемпературная обработка приводит к уменьшению объема ячеек кристаллических фаз практически в четыре раза, что вызывает существенную деструкцию каркаса гипсового камня.

Таблица 4

Минеральный состав вяжущих

Table 4

Mineral composition of binders

Минеральный состав	Содержание НВ (вес.%)			
	Контрольный состав	30	50	70
Кварц	1,5	33,1	53,5	67,5
Кальцит	1,5	3,1	3,3	3,0
Гипс	87,9	55,8	36,7	28,2
Гидроксизеллестадит	–	3,5	4,8	1,4
Бассанит	5,7	4,5	1,64	–

В системе гипсово-кремнеземистого вяжущего в процессе его твердения из основных компонентов: НВ и полуводного гипса (бассанита) происходит формирование трех фаз: кварца, гипса, гидроксизеллестадита по двум механизмам – гидратационному и негидратационному.

Формирование кварца происходит непосредственно в объеме НВ без участия дополнительных компонентов по негидратационному механизму в результате удаления воды из системы. Негидратационный механизм формирования кварца включает в себя два процесса:

- полимеризацию, проявляющуюся в связывании мономеров SiO₂;
- поликонденсацию, наблюдаемую в результате сушки и удаления структурной воды из системы.

В результате этих двух процессов происходит рост микрокристаллов кварца на кварцевых частицах НВ из аморфной составляющей НВ по механизму автоэпитаксии.

Формирование гипса и гидроксиллестадита осуществляется по гидратационному механизму с образованием гидратов ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$), характеризующихся наличием структурной воды.

В данном контексте механизм принято считать гидратационным, если в процессе химического взаимодействия компонентов вода входит в структуру новообразующегося продукта и выполняет структурообразующую роль, т.е. при условии удаления воды происходит полное разрушение структуры, как в случае гипсового камня под действием высокой температуры (рис. 1).

Снижение усадочных деформаций под действием высокой температуры в композиционном вяжущем в сравнении с чистым гипсовым камнем объясняется тем, что при температуре 1000°C минеральный состав гипсово-кремнеземистого вяжущего трансформируется в композицию: β -кварц (19), известь (26), периклаз (2), нерастворимый (ромбический) ангидрит (7), элестадит (6), $\alpha\text{-L-Ca}_2\text{SiO}_4$ (30) и ольдгамит – CaS (10). Отличительной особенностью этой композиции является то, что сумма молярных объемов всех кристаллических фаз при увеличении термического воздействия от комнатной температуры до 1000°C проходит через три стадии трансформационных преобразований структуры: ослабление $\rightarrow$ стабилизация $\rightarrow$ восстановление, возвращаясь в первоначальное состояние объема. Поэтому отношение суммы объемов кристаллических фаз в гипсово-кремнеземистой системе до и после температурной обработки близко к единице. Этим обеспечивается отсутствие деструктивного формоизменения при термическом воздействии (рис. 1).

Рис. 1. Преобразования кристаллических решеток минеральных фаз гипсово-кремнеземистого и гипсового вяжущего до и после высокотемпературной обработки

Fig. 1. Transformation of the crystal lattices of the mineral phases of gypsum-siliceous and gypsum binder before and after high-temperature processing

Согласно проведенному микроструктурному анализу структура КГНВ в значительной степени отличается от структуры чистого гипсового камня.

А именно, в структуре консолидированного гипсового вяжущего присутствуют довольно большие кристаллические формы, связанных между собой посредством контактных точек срастания (рис. 2, а).

Рис. 2. Микроструктура: а) ГВ; б) КГНВ с 70% НКК до термообработки
Fig. 2. Microstructure: a) gypsum binder; b) composite gypsum nanostructured binder with 70% nanostructured silica component before heat treatment

Кроме того, микроструктура КГНВ демонстрирует, что добавление кремнеземистого компонента в виде НВ в гипсовую систему инициирует размерную и морфологическую трансформацию в кристаллических образованиях гипсового камня. Зафиксировано, что повышение концентрации НВ вызывает появление одиночных кристаллических форм, характерных для гипсовой системы. При этом, отсутствие контактов срастания между отдельными кристаллами объясняет более низкие показатели прочности вяжущего (рис. 2, б).

В свою очередь, микроструктурные особенности чистого гипсового камня после высокотемпературного воздействия (рис. 3, а) характеризуются классическими одиночными кристаллами с типичной ангидридной морфологией. С другой стороны, структура композиционного вяжущего КГНВ (рис. 3, б) представляет собой комплекс, состоящий из кристаллических образований пластинчатой формы, а также изометричных кристаллов. Пространственно-морфологические особенности микроструктуры представляют собой эпитаксию изометричных кристаллов на поверхности пластин.

Рис. 3. Микроструктура: а) ГВ; б) КГНВ с 70% НКК после термообработки при 800°C
Fig. 3. Microstructure: a) gypsum binder; b) composite gypsum nanostructured binder with 70% nanostructured silica component after heat treatment at 800°C

Формирование структурно-связанных контактных областей между образующимися новообразующимися фазами и филлерами в составе композиционных вяжущих систем является одним из определяющих параметров, обеспечивающих более высокие значения прочности и иные важные эксплуатационные характеристики в конечных материалах строительного назначения. В значительной степени это применимо к рассматриваемой в данной работе системе КГНВ, для которой характерен эффект суперпозиции применительно к механизмам твердения.

Выводы

На основании проведенных в рамках работы исследований, была рассмотрена и подтверждена реальная возможность синтеза термостойких композитов строительного назначения на основе КНГВ с применением наноструктурированного вяжущего в качестве активного компонента в широком концентрационном спектре.

С помощью микроструктурного анализа установлены особенности механизма образования минеральных, в том числе, кристаллических фаз в составе КГНВ с учетом проявления эффекта суперпозиции, проявляющегося в виде параллельной реализации структурообразующих процессов, таких как: полимеризация, поликонденсация и гидратация. Полученные экспериментальные результаты и закономерности позволили выявить термостойкость исследуемых композиций в условиях воздействия высоких температур (до 1000°C). Установленная характеристика обеспечивается процессами кристаллообразования при участии НВ в качестве активной кремнеземистой составляющей.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра Высоких Технологий, БГТУ им. В.Г. Шухова

Литература

1. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Влияние составов материалов на формирование структуры строительных материалов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №4. С. 69 – 79.
2. Булдыжова Е.Н., Гальцева Н.А. Бурьянов А.Ф. Модификация структуры ангидритовых и гипсовых вяжущих веществ // «Строительство – формирование среды жизнедеятельности»: Сборник тезисов 16 Международной межвузовской научно-формирования среды практической конференции. М., МГСУ. 2013. С. 468 – 470.
3. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф. Новиченкова Т.Б. Малоэнергоемкие гипсовые материалы и изделия на основе отходов промышленности // Строительные материалы. 2006. №7. С. 8 – 9.
4. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф. и др. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения // Строительные материалы. 2010. №7. С. 22 – 23.
5. Бурьянов А.Ф., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Полеонова Ю.Ю. Модифицированные гипсовые безобжиговые композиты // Строительные материалы. 2013. №5. С. 76 – 78.
6. Войтович Е.В., Чулкова И.Л., Фомина Е.В., Череватова А.В. Повышение эффективности цементных вяжущих с активным минеральным нанодисперсным компонентом // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №5. С. 56 – 62.
7. Урханова Л.А., Дашицыренов Д.Д., Заяханов М.Е. Эффективный пенобетон на основе эффузивных пород // Строительные материалы. 2007. №4. С. 50 – 51.
8. Фомина Е.В., Строкова В.В., Кудеярова Н.П. Особенности применения предварительно гашеной извести в ячеистых бетонах автоклавного твердения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. №5. С. 29 – 34.
9. Агеева М.С., Карацупа С.В., Помошников Д.Д. Регулирование свойств шлако-цементного вяжущего // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 26 частях «Современные тенденции в образовании и науке». Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». 2013. С. 8 – 9.
10. Чижов Р.В., Кожухова Н.И., Строкова В.В., Жерновский И.В. Алумосиликатные бесклнкерные вяжущие и области их использования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №4. С. 6 – 10.
11. Калашников В.И., Хвастунов Н.И., Мактридин А.А., Карташов В.Л. Новые геополлимерные материалы из горных пород, активированные малыми добавками шлаков и щелочей // Строительные материалы. 2006. №6. С. 93 – 95.
12. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. 2008. №9. С. 77 – 80.
13. Cherevatova A.V. Principles of creating nanostuctured binders based on HCBS // Refractories and Industrial Ceramics. 2010. T. 51. №2. С. 118 – 120.
14. Zuev A.S., Doroganov V.A., Evtushenko E.I. The use of artificial ceramic binders based on thermally activated high-alumina raw materials in a semi-dry pressing technology // Refractories and Industrial Ceramics. 2012. Vol. 53. №2. P. 97 – 100.
15. Corundum and Zirconia Composites Based on Artificial Ceramic Binders / V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, N.A. Peretokina, V.I. Onishchuk at al. // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. N1, May. P. 92 – 97.
16. Study of Artificial Ceramic Binder Properties in the System $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / S.V. Zaitsev, V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, E.I. Evtushenko // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 57. №5, January. P. 526 – 530.
17. Войтович Е.В., Череватова А.В., Жерновский И.В., Алехин Д.А. Гипсокремнеземные строительные композиты с повышенной жаростойкостью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №6. С. 74 – 80.
18. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization // Journal of Applied Crystallography. 2004. №37. P. 743 – 749.

References

1. Lesovik V.S., CHulkova I.L. Vliyanie sostavov materialov na formirovanie struktury stroitel'nyh materialov. Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii. 2015. 4. P. 69 – 79. (rus.)
2. Buldyzhova E.N., Gal'ceva N.A. Bur'yanov A.F. Modifikaciya struktury angidritovyh i gipsovyh vyazhushchih veshchestv. «Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti»: Sbornik tezisov 16 Mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-formirovanie sredy prakticheskoy konferencii. M., MGSU. 2013. P. 468 – 470. (rus.)
3. Petropavlovskaya V.B., Bur'yanov A.F. Novichenkova T.B. Maloenergoemkie gipsovye materialy i izdeliya na osnove othodov promyshlennosti. Stroitel'nye materialy. 2006. 7. P. 8 – 9. (rus.)
4. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B., Bur'yanov A.F. i dr. Optimizaciya vnutrennej struktury dispersnyh sistem negidracionnogo tverdeniya. Stroitel'nye materialy. 2010. 7. P. 22 – 23. (rus.)
5. Bur'yanov A.F., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Poleonova YU.YU. Modificirovannye gipsovye bezobzhigovye kompozity. Stroitel'nye materialy. 2013. 5. P. 76 – 78. (rus.)
6. Vojtovich E.V., CHulkova I.L., Fomina E.V., CHerevatova A.V. Povyshenie effektivnosti cementnyh vyazhushchih s aktivnym mineral'nyim nanodispersnym komponentom. Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii. 2015. 5. P. 56 – 62. (rus.)
7. Urhanova L.A., Dashicyrenov D.D., Zayahanov M.E. Effektivnyj penobeton na osnove effuzivnyh porod. Stroitel'nye materialy. 2007. 4. P. 50 – 51. (rus.)
8. Fomina E.V., Strokova V.V., Kudeyarova N.P. Osobennosti primeneniya predvaritel'no gashenoy izvesti v yacheistyh betonah avtoklavno tverdeniya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2013. 5. P. 29 – 34. (rus.)
9. Ageeva M.S., Karacupa S.V., Pomoshnikov D.D. Regulirovanie svoystv shlakovo-cementnogo vyazhushchego. Sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 26 chastyah «Sovremennye tendencii v obrazovanii i nauke». Tambov: OOO «Konsaltingovaya kompaniya YUkom». 2013. P. 8 – 9. (rus.)
10. CHizhov R.V., Kozhuhova N.I., Strokova V.V., ZHernovskij I.V. Alyumosilikatnye besklinskernye vyazhushchie i oblasti ih ispol'zovaniya. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2016. 4. P. 6 – 10. (rus.)
11. Kalashnikov V.I., Hvastunov N.I., Maktridin A.A., Kartashov V.L. Novye geopolimernye materialy iz gornyh porod, aktivirovannye malymi dobavkami shlakov i shchelochej. Stroitel'nye materialy. 2006. 6. P. 93 – 95. (rus.)
12. Rahimova H.P. Sostoyanie i perspektivnye napravleniya razvitiya issledovanij i proizvodstva kompozicionnyh shlakoshchelochnyh vyazhushchih, rastvorov i betonov. Stroitel'nye materialy. 2008. 9. P. 77 – 80. (rus.)
13. Cherevatova A.V. Principles of creating nanostructured binders based on HCBS. Refractories and Industrial Ceramics. 2010. 51 (2). P. 118 – 120.
14. Zuev A.S., Doroganov V.A., Evtushenko E.I. The use of artificial ceramic binders based on thermally activated high-alumina raw materials in a semi-dry pressing technology. Refractories and Industrial Ceramics. 2012. 53 (2). P. 97 – 100.
15. Doroganov V.A., Doroganov E.A., Peretokina N.A., Onishchuk V.I. at al. Corundum and Zirconia Composites Based on Artificial Ceramic Binders. Refractories and Industrial Ceramics. 2016. 57 (1). P. 92 – 97.
16. Zaitsev S.V., Doroganov V.A., Doroganov E.A., Evtushenko E.I. Study of Artificial Ceramic Binder Properties in the System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--SiC}$. Refractories and Industrial Ceramics. 2017. 57 (5). P. 526 – 530.
17. Vojtovich E.V., CHerevatova A.V., ZHernovskij I.V., Alekhin D.A. Gipsokremnezemnye stroitel'nye kompozity s povyshennoj zharostojkost'yu. Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova. 2014. 6. P. 74 – 80. (rus.)
18. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization. Journal of Applied Crystallography. 2004. 37. P. 743 – 749. (rus.)

*Cherevatova A.V., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Zhernovskaya I.V., Senior Lecturer,
Alehin D.A., Postgraduate,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,
Kozhukhova M.I., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Research Officer,
University of Wisconsin-Milwaukee, USA,
Kozhukhova N.I. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Yakovlev E.A. Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia*
*Corresponding author E-mail: kozuhovanata@yandex.ru

THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT OF COMPOSITE NANOSTRUCTURED GYPSUM BINDER CHARACTERIZED BY INCREASED HEAT RESISTANCE

Abstract: there are a lot of different types of binders for construction purpose, a strong interest is focused on free-of-cement binders of new generation, which are characterized by unique and/or improved performance properties. Among them there is composite nanostructured gypsum binder (CNGB) as a quite new binding system. In the framework of this study the hypothesis of synergetic effect in hardened binding system was proposed and approved. The hypothesis is realized when interaction of two binding systems with different structure formation mechanism such as followings: polymerization-polycondensation and hydration. A number of experiments were carried out and the results were obtained, which demonstrate a resistance of CNGB under high-temperature effect (up to 1000°C) vs. ordinary gypsum binder. It was determined that a heat-resistance of CNGB is associated with joint crystallization of sulphate-based component (gypsum binder) and highly-reactive silica-based component (in nanostructured binder). Normally, nanostructured binder is stable under high-temperature exposure. The indicator of synergetic effect is formation of new crystalline phase – hydroxyllestadite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$. This phase has unit cell size which is stable under temperature gradient. This characteristic allows saving structure framework in CNGB under high temperature.

Keywords: nanostructured binder, gypsum binder, synergetic effect, structure formation mechanisms, hydroxyllestadite

Для цитирования: Череватова А.В., Жерновская И.В., Алехин Д.А., Кожухова М.И., Кожухова Н.И., Яковлев Е.А. Теоретические аспекты создания композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего повышенной жаростойкости // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №4. С. 5 – 13. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-5-13

For citation: Cherevatova A.V., Zhernovskaya I.V., Alehin D.A., Kozhukhova M.I., Kozhukhova N.I., Yakovlev E.A. Theoretical aspects of development of composite nanostructured gypsum binder characterized by increased heat resistance. Construction Materials and Products. 2019. 2 (4). P. 5 – 13. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-5-13

Поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.
Принята в доработанном виде 3 июня 2019 г.
Одобрена для публикации 5 июля 2019 г.

Received: April 25, 2019.
Revised: June 3, 2019.
Accepted: July 5, 2019.