

*Д-р техн. наук В. В. Примаченко, Э. Л. Карякина,
канд. техн. наук Л. А. Бабкина, канд. техн. наук Л. К. Савина,
канд. техн. наук И. В. Хончик, Л. М. Щербак, Л. Н. Никулина
(ПАО «УКРНИИ ОГНЕУПОРОВ ИМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»,
г. Харьков, Украина)*

Исследование микроструктуры в суспензиях из дисперсных материалов, содержащихся в шихте низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонов с добавкой шлама нормального электроплавленного корунда

Введение

Исследование процессов структурообразования в вибролитых огнеупорных массах, в том числе и в огнеупорных бетонах, является перспективным научным направлением в технологии огнеупоров [1—9]. Результаты этих исследований успешно используются при разработке новых и совершенствовании существующих технологий изготовления крупногабаритных и сложной конфигурации огнеупорных изделий.

В ПАО «УКРНИИ ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» разработана технология изготовления низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонов из зернистых масс с использованием в шихте различного количества отходов производства (дисперсного шлама нормального электроплавленного корунда производства ПАО «ЗАПОРОЖАБРАЗИВ»), о чем кратко сообщалось в работе [8] и подробно — в работе [9]. В работе [8] кратко изложен также механизм структурообразования в этих бетонах. В работе [9] подробно изложены результаты технологических исследований по получению указанных бетонов, в том числе исследований растекаемости и прочности структуры (последнюю определяли на коническом пластометре Ребиндера) в зависимости от времени хранения бетонов в эксикаторе, а также результаты исследований предела прочности при сжатии образцов из этих бетонов после 7 суток их хранения на воздухе и высушивания при температуре 110 °С. Всего в работе [9] было исследовано 4 бетона. В бетонах всех составов содержались в одинаковых ко-

личества зернистые нормальный электроплавленный корунд и карбид кремния черный с максимальным размером зерен соответственно 3 и 0,25 мм и тоже в одинаковых количествах дисперсные глина часов-ярская, а также высокоглиноземистый цемент. В качестве разжижающей добавки был использован в одинаковых количествах триполифосфат натрия. Кроме того, в первом (базовом) бетоне содержались дисперсные нормальный электроплавленный корунд (13 %) и глинозем α -формы (10 %), во втором бетоне — дисперсные шлам (13 %) и глинозем α -формы (10 %), в третьем бетоне — дисперсные нормальный корунд (13 %) и шлам (10 %), в четвертом бетоне — дисперсный шлам (23 %). Было установлено, что растекаемость всех свежеприготовленных бетонов является высокой и она зависит от наличия или отсутствия в их составах глинозема, а также от количества шлама. Самая высокая растекаемость была у базового бетона; несколько ниже, хотя практически такая же — у второго бетона, существенно более низкая — у третьего бетона и самая низкая — у четвертого бетона. После 1 ч выдерживания бетонов их растекаемость хотя и уменьшилась, но была близкой к растекаемости свежеприготовленных бетонов. После 5—6 ч хранения растекаемость бетонов резко уменьшилась, однако из них еще было возможным изготовление качественных образцов. После 7—8 ч выдерживания бетонов их низкая растекаемость уже не обеспечила получение качественных образцов. Прочность структуры бетонов была низкой и не превышала даже после 6 ч 1,2 Н/мм². Значения предела прочности при сжатии образцов после 7 суток их хранения на воздухе и высушивания при температуре 110 °С были высокими (15,5—19,8 Н/мм²), самая высокая прочность — у образцов из второго бетона, содержащего 13 % шлама и 10 % глинозема, самая низкая прочность — у образцов из четвертого бетона, содержащего 23 % шлама.

В результате выполненных в работе [9] исследований установлена целесообразность как частичной, так и полной замены в корундокарбидкремниевых бетонах дисперсных нормального электроплавленного корунда и глинозема α -формы на дисперсный шлам нормального электроплавленного корунда ПАО «Запорожбразив» для различных мест применения этих бетонов в зависимости от условий их службы.

В настоящей статье подробно изложены результаты электронномикроскопических исследований микроструктуры в суспензиях из дисперсных материалов, содержащихся в шихте указанных бетонов.

Таблица 1

Химический и фазовый составы нормального электроплавленного корунда, глинозема и шлама нормального электроплавленного корунда

Наименование материала	Содержание оксидов, мас. %										Петрографическое описание
	$\Delta m_{\text{прк}}$	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	TiO_2			
Нормальный электроплавленный корунд	0,22	94,40	2,04	0,60	Не опр.	0,41	Не опр.	2,33			Основная масса пробы представлена твердым раствором (с TiO_2) корунда $\sim 90-94$ об. %, а примеси — твердым раствором гексаалюмината кальция CA_6 с $\text{Ti}_2\text{O}_3 - 2-7$ об. % и черными немагнитными зернами — $3-7$ об. %
Глинозем марки ГК-1 (данные спектрального анализа)	Не опр.	99,72	0,10	0,02	«-»	0,02	0,13	0,01			Проба представлена округло-полигональными, угловатыми неправильной формы, короткопризматическими частицами таблитчатого облика (кроме призматических) и хрупкими (непрочными) агрегатами-сферолидами из этих частиц (количество агрегатов до ~ 50 %). Максимальный размер частиц 50 мкм, агрегатов — 100 мкм, преобладающий — $\sim 4-20$ мкм и $30-80$ мкм соответственно. Толщина табличек 6 мкм (максимальная) и ~ 4 мкм (преобладающая). Содержание $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \sim 97-98$ об. %, щелочной β -глинозем $\sim 1-3$ об. %
Шлам нормального электроплавленного корунда ^{*)}	3,15	78,35	9,50	2,80	1,89	0,92	0,89	2,50			Проба содержит твердый раствор корунда с $\text{TiO}_2 \sim 70-75$ об. %, твердый раствор гексаалюмината кальция CA_6 с $\text{TiO}_2 \sim 3-5$ %, черные немагнитные зерна (соединения на основе Ti) $\sim 15-20$ об. %, стекловидное вещество (шарики) $\sim 1-2$ об. %; красные бурые анизотропные зерна (соединения железа) $\sim 1-2$ об. %

*) Огнеупорность шлама составляет $> 1780^\circ\text{C}$.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовали следующие сырьевые материалы, входящие в состав дисперсной составляющей шихты низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонов с добавкой шлама нормального электроплавленного корунда, разработанных в работе [9]: нормальный электроплавленный корунд производства ПАО «ЗАПОРОЖАБРАЗИВ»; неметаллургический глинозем марки ГК-1 производства ОАО «Бокситогорский глиноземный завод» (Россия); шлам нормального электроплавленного корунда производства ПАО «ЗАПОРОЖАБРАЗИВ»; глину часов-ярскую марки Ч-2 по ТУ У 08.1-00190503-364:2012 фракции < 0,09 мм; высокоглиноземистый цемент марки ВГЦ-73, изготавливаемый ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» с максимальным размером зерна 45 мкм (удельная поверхность 7200 см²/г); натрий триполифосфат технический (Китай).

Химический и фазовый составы нормального электроплавленного корунда, глинозема и шлама нормального электроплавленного корунда приведены в табл. 1, их дисперсность — в табл. 2.

Таблица 2

Дисперсность нормального электроплавленного корунда, глинозема и шлама нормального электроплавленного корунда

Наименование материала	Размер частиц, мкм	
	максимальный	преобладающий
Нормальный электроплавленный корунд	100	30—80
Глинозем	50	4—12
Шлам нормального электроплавленного корунда	100	20—60

По данным электронномикроскопических исследований¹, шлам нормального электроплавленного корунда в сухом виде представляет собой порошок, имеющий в своем составе значительное количество ультрадисперсных частичек во фракции менее 4 мкм. Сразу после затворения шлама водой наблюдается образование бесформенных гелеобразных продуктов, местами в виде сгустков, в основном невысокой плотности и агрегатов из частиц (рис. 1).

Для выяснения механизма структурообразования в низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонах были проведены электронномикроскопические исследования процессов, протекающих в суспензиях из тонкомолотой составляющей

¹ Электронномикроскопический анализ исследуемых материалов был выполнен на электронном микроскопе ЭМВ-100АК.

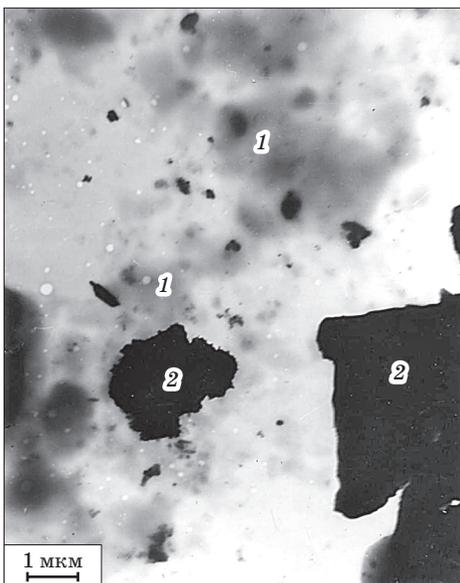


Рис. 1. Микроструктура суспензии дисперсного шлама нормального электроплавленного корунда сразу после затворения водой: 1 — гелеобразные сгустки; 2 — агрегат из частиц

разработанных в работе [9] бетонов и разжижающей добавки (так как механизм структурообразования в крупнозернистых массах, содержащих тонкодисперсную составляющую и разжижающую добавку, аналогичен таковому для дисперсных систем [1]). При проведении исследований тонкомолотые компоненты и триполифосфат натрия были взяты в таких же соотношениях, в которых они содержатся в составах бетонных смесей.

Вещественный состав суспензий представлен в табл. 3 (номера составов суспензий приняты такими же, как и номера в работе [9] составов соответствующих бетонов).

Таблица 3

Вещественный состав суспензий, мас. %

Наименование компонентов	Номер состава			
	1	2	3	4
Нормальный электроплавненный корунд	41,94	—	41,94	—
Шлам нормального электроплавленного корунда	—	41,9	32,25	74,19
Глинозем марки ГК-1	32,25	32,25	—	—
Глина марки Ч-2 ^{*)}	+	+	+	+
Цемент марки ВГЦ-73 ^{*)}	+	+	+	+
Триполифосфат натрия (сверх 100 %) ^{*)}	+	+	+	+
Вода (сверх 100 %) ^{*)}	+	+	+	+

^{*)} Содержание глины, цемента, триполифосфата натрия и воды в каждой суспензии было, как отмечено выше, одинаковым.

Визуально было установлено: степень разжижения свежеприготовленной суспензии из состава 1, содержащего дисперсные глинозем и нормальный электроплавненный корунд, была самой высокой; затем ниже (хотя совсем незначительно) — из со-

става 2, содержащего глинозем и шлам нормального электроплавленного корунда; суспензии из состава 3, содержащего нормальный электроплавленный корунд и шлам нормального электроплавленного корунда, — существенно ниже, чем из состава 2, а суспензии из состава 4, содержащего только шлам нормального электроплавленного корунда, — еще значительно ниже, чем состава 3. Это объясняется, как показано в работе [9], более сильным разжижающим действием триполифосфата натрия на находящийся в корундокарбидкремниевом бетоне дисперсный глинозем α -формы, менее сильным — на дисперсный нормальный электроплавленный корунд и значительно менее сильным — на дисперсный шлам нормального электроплавленного корунда.

Электронномикроскопические исследования микроструктуры суспензий выполняли через 1, 3 и 7 ч хранения их в эксикаторе. Через 10—11 ч выдерживания суспензии уже практически не растекались и перестали быть суспензиями. Микроструктуру затвердевших суспензий исследовали через 24, 48 и 168 ч после их приготовления, но их все время также хранили в эксикаторе.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура суспензий после 1, 3 и 7 ч их выдерживания в эксикаторе приведена на рис. 2—4 соответственно, затвердевших суспензий после 24, 48 и 168 ч их выдерживания (также в эксикаторе) — на рис. 5—7.

Как видно из рис. 2, во всех суспензиях через 1 ч после их затворения водой частицы практически полностью разобщены, однако имеются отдельные точечные коагуляционные контакты. Это свидетельствует о начале процесса образования в суспензиях непрочной коагуляционной структуры. Одновременно с этим на всех частицах высокоглиноземистого цемента наблюдается слой геля гидроалюминатов кальция, образующихся при гидратации алюминатов кальция, содержащихся в цементе.

Из рис. 2 также видно, что характер микроструктуры суспензий составов 2, 3 и 4 (рис. 2, б—г), содержащих соответственно 41,94; 32,25 и 74,19 мас. % шлама нормального электроплавленного корунда, отличается от характера микроструктуры суспензии состава 1, не содержащей шлама. В суспензиях состава 2, 3 и 4 все частицы покрыты тонким слоем геля шлама и контактируют между собой через этот слой геля. Поэтому коагуляционные структуры в суспензиях этих составов еще менее прочные, чем в суспензии состава 1. Кроме того, на частицах

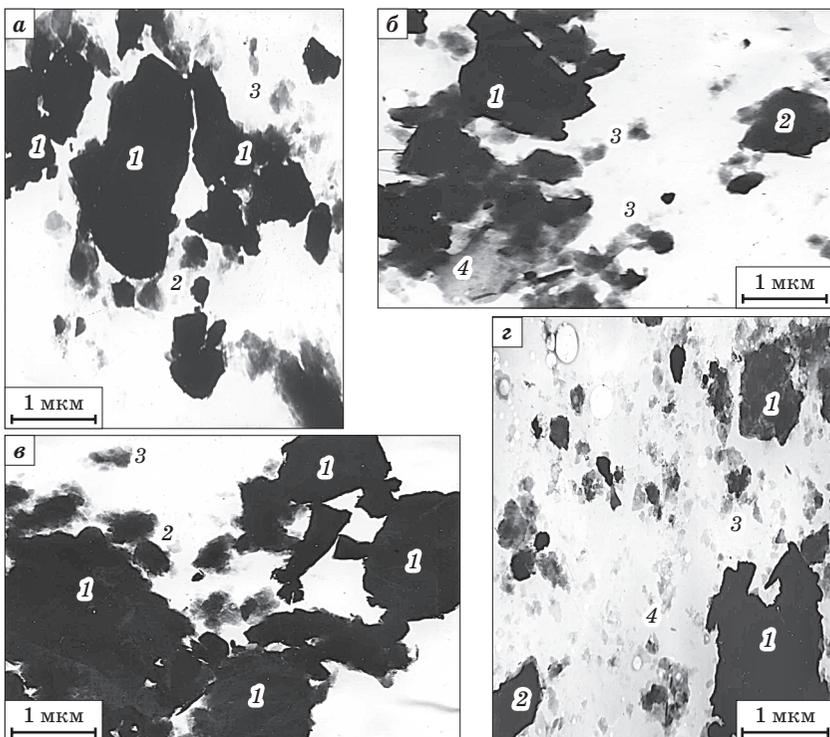


Рис. 2. Микроструктура суспензий, образовавшаяся через 1 ч после затворения водой: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (г) (1 — Al_2O_3 ; 2 — цемент, покрытый цементным гелем; 3 — глина; 4 — гель шлама)

цемента в суспензиях составов 2, 3 и 4 наблюдается более тонкий слой геля гидроалюминатов кальция, хотя и незначительно, т. е. гель шлама несколько затрудняет гидратацию цемента. В суспензиях составов 3 (рис. 2, в) и 4 (рис. 2, г), не содержащих самый дисперсный компонент (глинозем), контактов между частицами меньше по сравнению с суспензиями составов 1 и 2, вследствие чего коагуляционная структура в них еще менее прочная, чем даже в суспензии состава 2. В суспензии состава 4, содержащей самое большое количество шлама (74,19 мас. %), все частицы контактируют между собою через самый толстый слой геля, и поэтому коагуляционная структура в ней является самой непрочной.

Через 3 ч после приготовления суспензий всех составов в них уже наблюдаются зародыши кристаллов гидроалюминатов

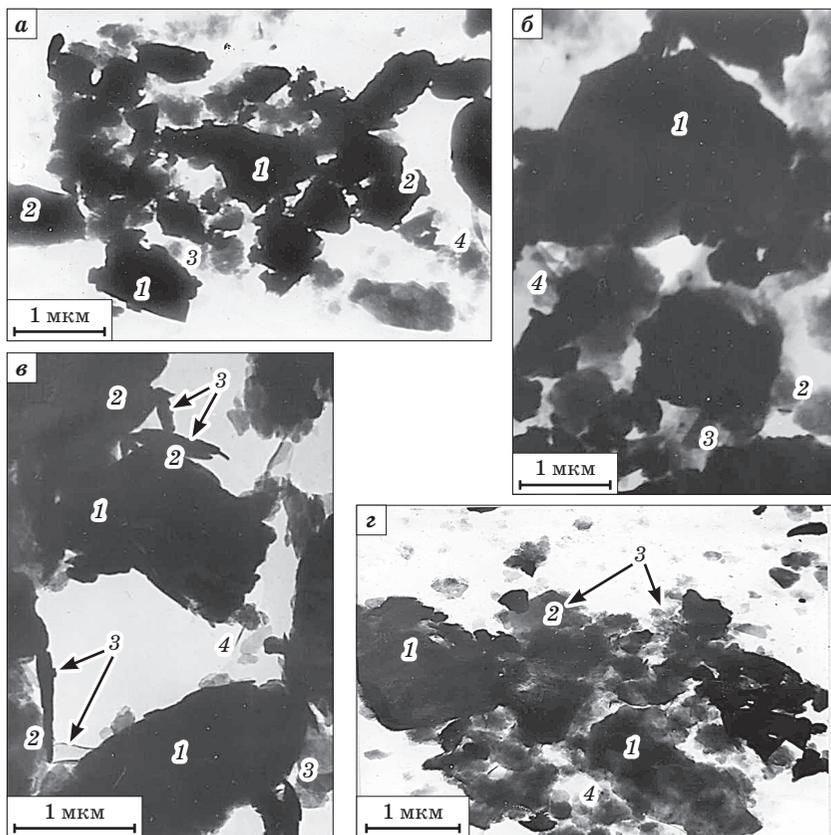


Рис. 3. Микроструктура суспензий, образовавшаяся через 3 ч после затворения водой: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (г) (1 — Al_2O_3 ; 2 — цемент, покрытый цементным гелем; 3 — зародыши кристаллов гидроалюминатов кальция; 4 — глина)

кальция (рис. 3, а—г), но во всех суспензиях между частицами еще, в основном, точечные коагуляционные контакты и только незначительное количество кристаллизационных контактов, т. е. в суспензиях после 3 ч их хранения уже образовалась смешанная коагуляционно-кристаллизационная структура с преимущественным преобладанием коагуляционной структуры над кристаллизационной.

Характер действия шлама на протекание процессов структурообразования в суспензиях составов 2, 3 и 4 через 3 ч после затворения их водой остается таким же, как и через 1 ч хранения суспензий. Влияние шлама на эти процессы зависит только

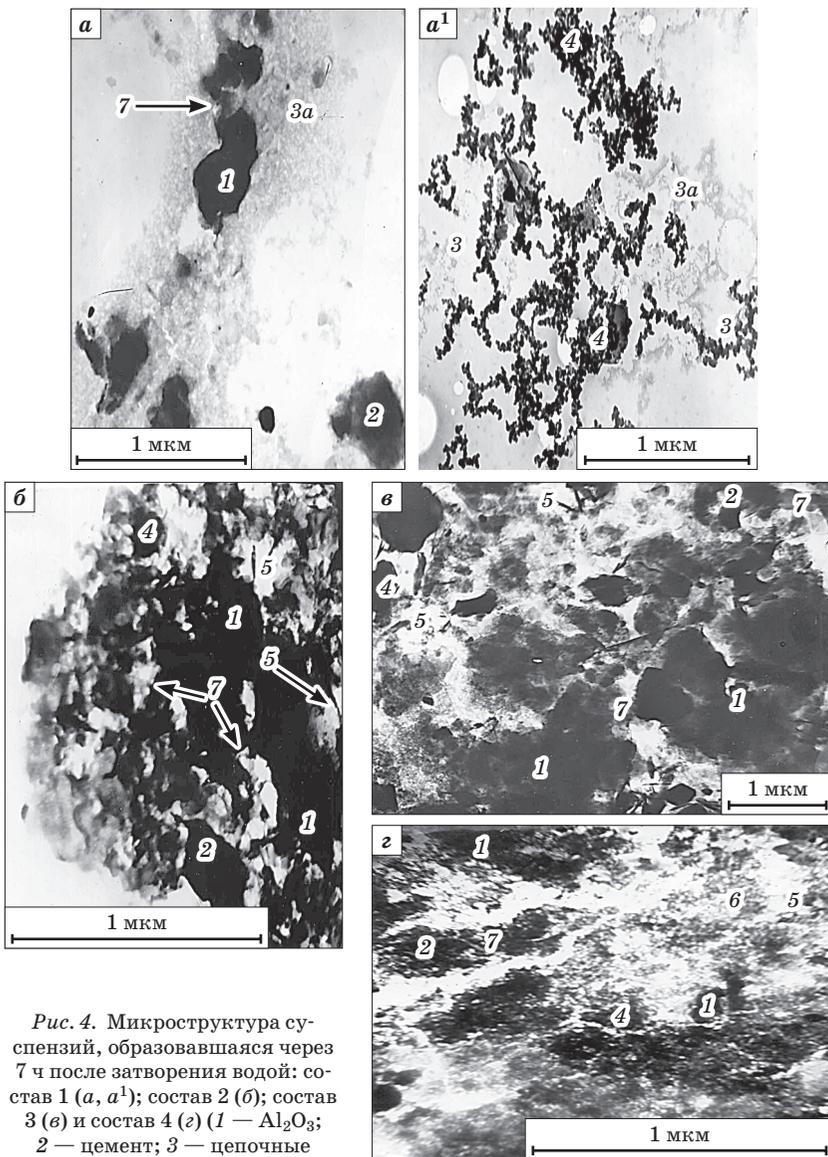
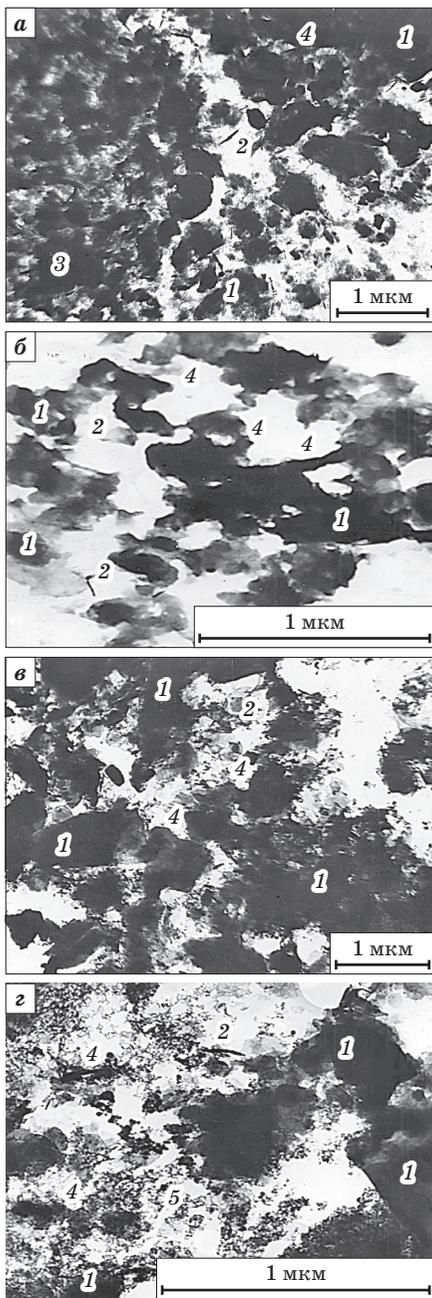


Рис. 4. Микроструктура суспензий, образовавшаяся через 7 ч после затворения водой: состав 1 (а, а¹); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (з) (1 — Al_2O_3 ; 2 — цемент; 3 — цепочные структуры гидроалюминатов кальция; 3а — цепочные структуры гидроалюминатов кальция в стадии зарождения; 4 — пластинчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 5 — игольчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 6 — мельчайшие новообразования, возникающие при кристаллизации геля шлама; 7 — мостики из кристаллов гидроалюминатов кальция)

Рис. 5. Микроструктура затвердевших суспензий, образовавшаяся через 1 сутки после затворения водой: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (г) (1 — Al_2O_3 ; 2 — игольчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 3 — пластинчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 4 — мостики из кристаллогидратов алюминатов кальция; 5 — тонкозернистая масса)

от его количества в суспензии. Самая непрочная смешанная коагуляционно-кристаллизационная структура после 3 ч хранения суспензий образовалась в суспензии состава 4, что видно на рис. 3, г по самым неплотным в ней коагуляционным и кристаллизационным контактам между частицами.

После 7 ч хранения суспензий (рис. 4, а—г) количество в них кристаллизационных контактов уже преобладает над коагуляционными контактами. Появляются мостики из кристаллов гидроалюминатов кальция. На примере суспензии состава 1 (рис. 4, а¹) видно, что на отдельных участках появляются цепочные кристаллизационные структуры из гидроалюминатов кальция. В суспензии состава 4 (рис. 4, г), содержащей самое большое количество шлама (74,19 мас. %), кристаллизационные контакты менее плотные, чем в суспензиях составов 2 и 3, и образовалось



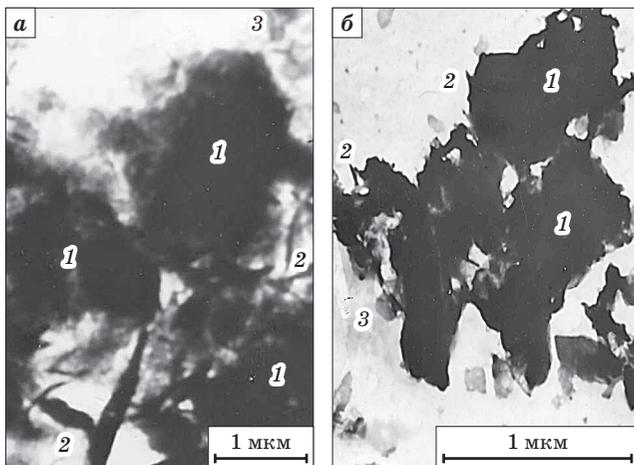


Рис. 6. Микроструктура затвердевших суспензий, образовавшаяся через 2 суток после затворения водой: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (г) (1 — Al_2O_3 ; 2 — игольчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 3 — пластинчатые кристаллогидраты алюминатов кальция)

большое количество мельчайших частиц размером 0,01—0,08 мкм, которые неплотно контактируют между собой. Поэтому в суспензии состава 4 после 7 ч ее хранения, как и после 3 ч, смешанная коагуляционно-кристаллизационная структура является самой непрочной.

Через 1 сутки после приготовления суспензий они были, как отмечено выше, в затвердевшем состоянии. Количество кристаллизационных контактов в них является преимущественным (рис. 5, а—г) по сравнению с выдержанны-

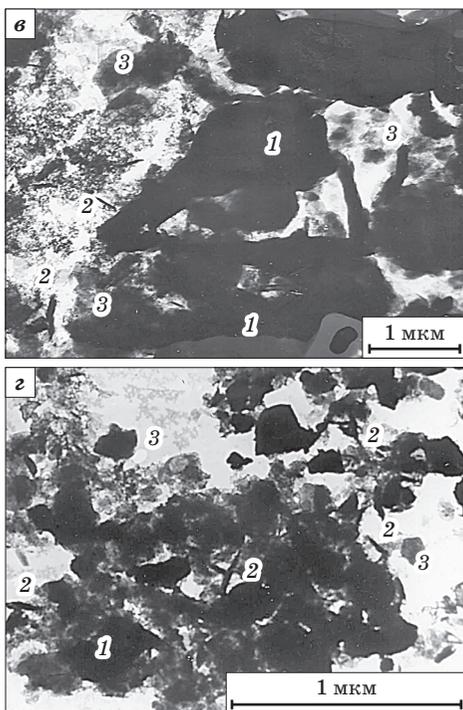
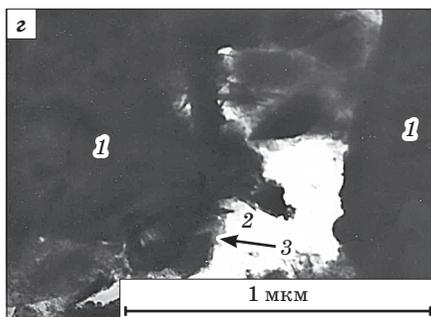
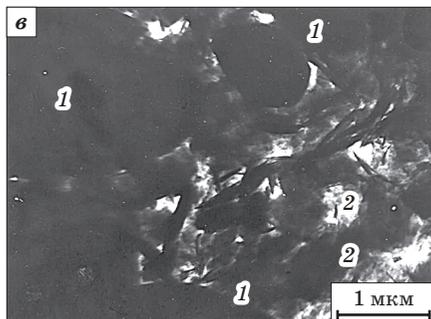
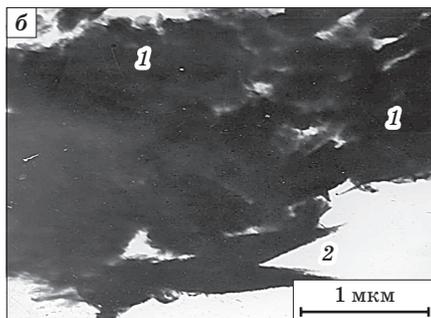
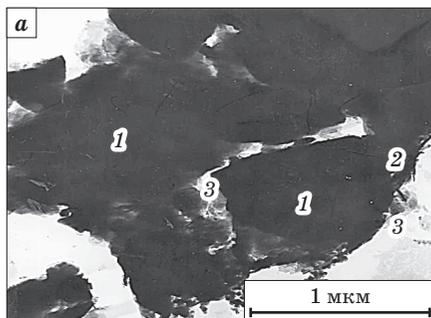


Рис. 7. Микроструктура затвердевших суспензий, образовавшаяся через 7 суток после затворения водой: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в) и состав 4 (г) (1 — Al_2O_3 ; 2 — игольчатые кристаллогидраты алюминатов кальция; 3 — пластинчатые кристаллогидраты алюминатов кальция)

ми суспензиями в течение 7 ч. Мостики увеличились в размерах. Между ними образовались кристаллические структуры, соединяющие зерна смеси. В суспензии состава 4 гидроалюминаты кальция представлены тонкозернистой массой, образующей единую фазу с гелем, что приводит к уменьшению прочности структуры по сравнению с другими суспензиями.

После 2 суток выдерживания суспензий в них наблюдаются хорошо сформированные кристаллические каркасы (рис. 6, а—г). Но в суспензии состава 4 каркас является «рыхлообразным».

Через 7 суток во всех суспензиях образовалась плотная кристаллизационная структура (рис. 7, а—г). Однако, в суспензии состава 4 микроструктура характеризуется расплывчатостью рельефа. У частиц отсутствуют четкая огранка и очертания. Толстые прослойки полуморфной и хлопьевидной массы покрывают



их поверхность. Это свидетельствует о несколько менее прочной кристаллизационной структуре в суспензии состава 4 по сравнению с другими суспензиями.

Сопоставляя данные по растекаемости разработанных в работе [9] низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонов с добавкой дисперсного шлама электроплавленного корунда, прочности их структуры и прочности изготовленных из них образцов через 7 суток твердения, приведенные в работе [9], а также данные настоящих электронномикроскопических исследований, можно сделать вывод, что в этих бетонах, содержащих высокоглиноземистый цемент и в качестве диспергирующей добавки триполифосфат натрия, процессы структурообразования протекают по следующему механизму. Первоначально в бетонах образуются коагуляционные структуры, и они преимущественно сохраняются в течение примерно 1 ч после приготовления бетонов, и в этот период времени обеспечивается их высокая растекаемость. Однако, как это видно из кривых растекаемости и прочности структур бетонов, приведенных в работе [9], их растекаемость начинает медленно уменьшаться, а прочность структуры — медленно увеличиваться сразу же после приготовления бетонов. Это свидетельствует о том, что в бетонах, наряду с образованием коагуляционных структур, начинается образование более прочных кристаллизационных структур за счет кристаллизации гидроалюминатов кальция, образующихся при гидратации алюминатов кальция, содержащихся в цементе, и в бетонах через 3 ч после их приготовления уже образовалась смешанная коагуляционно-кристаллизационная структура с последующим постепенным преобладанием кристаллизационной структуры над коагуляционной. После 6 ч выдерживания бетонов в них еще превалирует, хотя и незначительно, коагуляционная структура над кристаллизационной. После 7 ч выдерживания кристаллизационная структура уже превалирует над коагуляционной. Дальнейшее образование и упрочнение кристаллизационной структуры на базе смешанной коагуляционно-кристаллизационной структуры продолжается, и через 1 сутки в бетонах существует преимущественно кристаллизационная структура, а через 7 суток твердения на воздухе все бетоны имеют плотную и прочную кристаллизационную структуру.

Заключение

Выполнены электронномикроскопические исследования микроструктуры в суспензиях из дисперсных нормального электроплавленного корунда, шлама нормального электроплавленного

корунда, глинозема α -формы, высокоглиноземистого цемента, глины часовой-ярской и триполифосфата натрия, входящих в состав дисперсной части шихты низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонов с добавкой указанного шлама.

В результате проведенных исследований установлен механизм структурообразования в низкоцементных корундокарбидкремниевых бетонах с добавкой шлама нормального электроплавленного корунда. Результаты исследований использованы при разработке технологии указанных бетонов.

Библиографический список

1. *Примаченко В. В.* Исследование процессов образования коагуляционных структур в вибролитых крупнозернистых тиксотропных массах / В. В. Примаченко // *Огнеупоры*. — 1994. — № 5. — С. 2—5.
2. Исследование процессов образования коагуляционных структур в вибролитых тонкозернистых хромосидных тиксотропных массах / В. В. Примаченко, П. П. Криворучко, Ю. Е. Мишнева [и др.] // *Зб. наук. пр. ВАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А. С. Бережного»*. — Х. : Каравела, 2002. — № 102. — С. 11—17.
3. Исследование процессов образования коагуляционных структур в вибролитых тиксотропных массах на основе карбида кремния / В. В. Примаченко, Л. К. Савина, Р. М. Федорук, А. Г. Хоружий // *Зб. наук. пр. ВАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А. С. Бережного»*. — Х. : Каравела, 2003. — № 103. — С. 36—44.
4. Исследование влияния некоторых технологических факторов на образование структур в вибролитых крупнозернистых массах корундового состава с добавкой Cr_2O_3 / В. В. Примаченко, И. Г. Шулик, Т. Г. Гальченко, Н. И. Гринева // *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. — Х. : ПАТ «УКРНДІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2011. — № 111. — С. 3—15.
5. Исследование микроструктуры в глиноземистых и глиноземхромоксидных суспензиях с добавками диспергаторов / В. В. Примаченко, Э. Л. Карякина, И. Г. Шулик [и др.] // *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. — Х. : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2012. — № 112. — С. 23—33.
6. Исследование структурно-реологических свойств вибролитых зернистых масс из ZrO_2 , стабилизированного CaO , в зависимости от вида и количества диспергирующих добавок / В. В. Примаченко, В. В. Мартыненко, И. Г. Шулик [и др.] // *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. — Х. : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2013. — № 113. — С. 3—13.
7. Влияние вида диспергирующих добавок Castament на структурно-реологические свойства вибролитой зернистой массы из ZrO_2 , стабилизированного CaO / В. В. Примаченко, В. В. Мартыненко, И. Г. Шулик [и др.] // *Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти : междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 29—30 апр. 2014 г. : тез. докл.* — Х. : Оригинал, 2014. — С. 3—5.
8. Зависимость свойств низкоцементного корундокарбидкремниевых бетона и образцов из него от количества добавки шлама нормального электроплавленного корунда / В. В. Примаченко, Л. А. Бабкина, Л. К. Савина [и др.] // *Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти : междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 11—12 мая 2016 г. : тез. докл.* — Х. : Оригинал, 2016. — С. 17—19.
9. Исследование влияния количества добавки шлама нормального электроплавленного корунда на свойства низкоцементного корундокарбидкремниевых бетона и образцов из него / В. В. Примаченко, Л. А. Бабкина, Л. К. Савина [и др.] // *Металлургическая и горнорудная пром-сть*. — 2016. — № 6. — С. 43—49.

Рецензент канд. техн. наук Чаплянко С. В.