

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101

**Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В.*
Белгородский государственный национальный исследовательский университет
**E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ ТИПОВ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ МАТРИЧНЫХ (ВЯЖУЩИХ) СИСТЕМ

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты комплексного изучения вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов высокоглиноземистых матричных систем, полученных полностью на основе отечественных компонентов – высокоглиноземистой высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии (ВКВС) и суспензии на основе реактивного глинозема (РГ). В качестве объектов исследования выступали четыре образца экспериментальных высокоглиноземистых матричных систем (ВМС), сопоставимые по своему гранулометрическому составу. Согласно результатам рентгенофазового анализа, ВМС на основе реактивного глинозема характеризуются содержанием фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ более 99 %, в то время как образцы ВКВС являются полифазными с преобладанием в минеральном комплексе муллита, альфа-оксида алюминия и кварца. Характер распределения частиц в исследованных образцах различен: представлены как мономодальные ВМС с узким распределением частиц и медианным размером порядка 0,8 мкм, так и бимодальные с медианным размером 4 мкм и более. Содержание субмикронной фракции (размер частиц менее 1 мкм) варьируется в пределах от 10–15 % до 60 %. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлены особенности микроструктуры и детально изучена морфология частиц твердой фазы ВМС обоих типов. С использованием микрорентгеноспектрального анализа установлен химический (элементный) состав исследованных материалов.

Ключевые слова: огнеупорные литьевые массы, керамобетоны, низкоцементные бетоны, матричные системы, суспензии, реактивный глинозем, дисперсность, сканирующая электронная микроскопия.

Введение. В последние десятилетия, как за рубежом, так и в России, широкое практическое применение получили огнеупорные литьевые массы (бетоны) нового поколения. Согласно общепринятым понятиям такие огнеупорные материалы можно рассматривать как композиционные (гетерогенные) системы, состоящие из огнеупорного заполнителя и матрицы (вяжущей системы). Условно принимается, что матрица является гомогенной, обладает свойствами непрерывности и выступает в роли дисперсионной среды. Заполнитель в свою очередь имеет границу раздела, а его зерна лишь ограниченно взаимодействуют с вяжущей системой [1–3].

В то же время такие вяжущие системы (матрицы) можно рассматривать как высококонцентрированные суспензии, дисперсной фазой в которых являются тонкие частицы огнеупорных компонентов, а дисперсионной средой является вода с добавками различной химической природы, вводимыми для регулирования реотехнологических свойств. Функция матричной системы (МС) заключается в том, что она способна консолидировать в единое целое многочисленные полидисперсные зерна заполнителя, что в свою очередь придает монолитность и заданную форму изделию или футеровке, а также обеспечивает передачу механических и термических

напряжений на заполнитель и предохраняет его от коррозионных воздействий [1, 4, 5].

В настоящее время можно выделить два альтернативных типа огнеупорных литевых масс нового поколения – керамобетоны (бесцементные огнеупорные бетоны) и низкоцементные литьевые массы [1, 6].

В технологии низкоцементных бетонов в качестве матрицы выступают системы, состоящие из высокоглиноземистого цемента и ультрадисперсных порошков. В последние десятилетия успешно апробированы в промышленных условиях ВМС для низкоцементных огнеупорных масс с применением тонкодисперсного активированного оксида алюминия – реактивного глинозема (РГ). Базовым сырьевым материалом для производства реактивного глинозема является кальцинированный оксид алюминия. Этот продукт получают обжигом (кальцинацией) байеровского гидроксида алюминия при температуре более 1200 °С. В результате указанного процесса образуются первичные кристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, размер которых зависит от термической истории и может находиться в диапазоне от 0,5 до 5 мкм. Чем выше температура обжига, тем больше размер плотных беспористых первичных кристаллов и содержание оксида алюминия в α -форме. В порошках реактивного глинозема твердофазный материал, как правило, измельчен до размера

первичных кристаллов (0,5 – 2 мкм), а значительная доля частиц имеет субмикронный размер (менее 1 мкм). Доля субмикронных частиц в готовых продуктах может находиться в пределах 20 – 90 %. Такие высокодисперсные порошки альфа-оксида алюминия реактивны в том смысле, что они легко спекаются до максимальной плотности при температурах на 100 – 200 °С ниже, чем грубодисперсные порошки. Структурная и поверхностная активность реактивных глинозёмов определяется дефектностью кристаллического строения, размером и формой частиц, что обуславливает уменьшение энергии активации спекания [7, 8]. В связи с вышесказанным к числу важных технологических преимуществ ВМС на основе реактивного глинозёма можно отнести не только улучшение реотехнологических свойств огнеупорных литевых масс, но и формирование плотной керамической матрицы при пониженных температурах спекания, а также отсутствие легкоплавких эвтектик. Это позволяет получать теплотехнические композиционные материалы с высокими эксплуатационными характеристиками [8–10]. Однако сама технология получения реактивного глинозёма, не является достаточно экологичной, поскольку предусматривает сухой помол кальцинированного высокоглинозёмистого сырья [11, 12], что обуславливает пылеунос ультрадисперсных частиц $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в окружающую среду. Как результат, это приводит к усложнению и удорожанию аппаратурно-технологического оформления, так как требует обязательного использования дорогостоящей аспирационной системы.

В технологии керамобетонов ВМС представлена высококонцентрированной керамической вяжущей суспензией (ВКВС). Концепция использования таких вяжущих в технологии огнеупорных литевых масс базируется на том факте, что большинство нативных кремнеземистых и алюмосиликатных минералов по своему строению можно рассматривать как неорганические полимеры [1, 5, 13]. ВКВС представляют собой минеральные водные суспензии, получаемые преимущественно путем мокрого помола в щелочной среде кремнеземистых или алюмосиликатных материалов при высокой концентрации твердой фазы и повышенной температуре. Именно в таких условиях происходит наработка определенной доли наночастиц – коллоидного компонента. Коллоидный компонент высококонцентрированных керамических вяжущих суспензией представляет собой довольно сложный состав, включающий, в том числе, остатки твердой фазы, продукты намолла мелющих тех, а также различного рода примеси, которые переходят в

дисперсионную среду при частичном растворении поверхности размалываемых твердых зерен. Благодаря наличию оптимальной доли наноразмерных коллоидных частиц достигается требуемая полидисперсность твердой фазы, и, как следствие, минимизация количества связанной жидкости. Это в свою очередь обеспечивает минимальную пористость и высокую прочность отливок [13–15]. Однако, матричные системы на основе ВКВС вместе с рядом очевидных преимуществ, имеют и существенные недостатки, связанные со сложностями при их транспортировке и хранении.

Целью настоящей работы являлся анализ вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов водных высокоглинозёмистых МС – высокоглинозёмистой высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии и суспензии на основе реактивного глинозёма.

Методология. В настоящей работе экспериментальными объектами являлись образцы двух типов высокоглинозёмистых матричных систем: 1 – на основе высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии (ВКВС-1 и ВКВС-2); 2 – на основе реактивного глинозёма (РГ-1 и РГ-2). Все компоненты вышеупомянутых типов МС были изготовлены на российских промышленных предприятиях из полностью отечественного импортнезависимого сырья.

Фазовый состав материалов определяли методом РФА на дифрактометре Ultima IV (Rigaku Япония) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), схема съёмки Брэгга-Брентано, со скоростью сканирования 2 град/мин в диапазоне углов 2θ от 10 до 70, с шагом сканирования $0,02^\circ$. Идентификация пиков проводилась с использованием базы данных PDF-2. Экспериментальные дифрактограммы обрабатывали с помощью программы PDXL (Rigaku Corporation) с уточнением по методу Ритвельда. Соотношение фаз рассчитывали методом корундовых чисел.

Гранулометрический состав экспериментальных образцов определяли методом лазерной дифракции с помощью анализатора «Microtrac S3500» (США). В качестве дисперсионной среды при исследовании использовали дистиллированную воду. Перед измерением проводили ультразвуковое диспергирование пробы в дисперсионной среде в течение 30 с.

Морфологические исследования материалов проводили на растровых электронных микроскопах Quanta 200 3D и Quanta 600 FEG (FEI, Нидерланды). Изображения получали с использованием детектора обратно-рассеянных электронов в режиме низкого вакуума. Давление в камере –

80 Па, ускоряющее напряжение – 30 кВ. Для исследования в сканирующем режиме образцы наклеивали на медную подложку с помощью проводящего углеродного клея.

Элементный состав твердой фазы суспензий определяли методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием анализатора

EDAX, совмещенного с растровым электронным микроскопом Quanta 200 3D.

Основная часть. На первом этапе исследования проведен анализ фазового состава представленных образцов ВМС. Установлено, что матричные системы на основе реактивного глинозема являются монофазными с содержанием α - Al_2O_3 (корунда) – более 99 % (рис. 1).

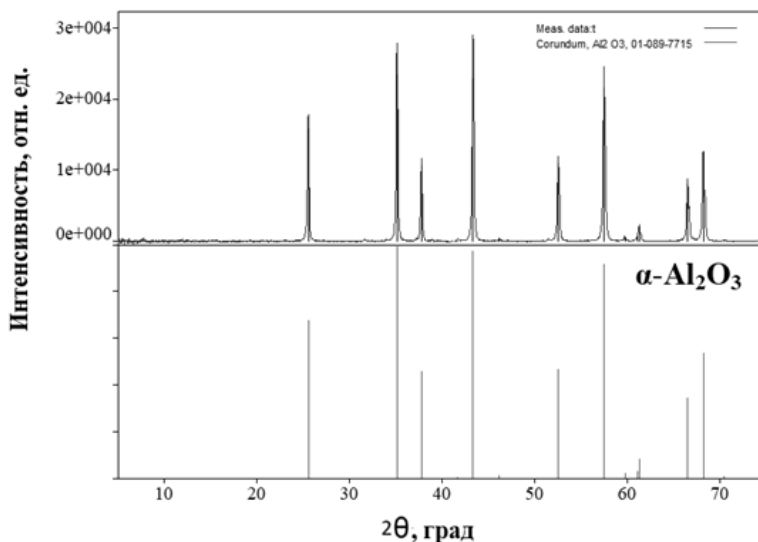


Рис. 1. Типичная рентгеновская порошковая дифрактограмма для образцов РГ-1 и РГ-2

Образцы ВКВС являются полифазными системами (рис. 2). Основными компонентами указанных образцов являются: муллит – содержание 55–57 %, α -оксид алюминия – в количестве 29–

32 %, кварц – в пределах 11–13 %. Также в минералогической композиции присутствует незначительная примесь кристобаллита (до 1 %).

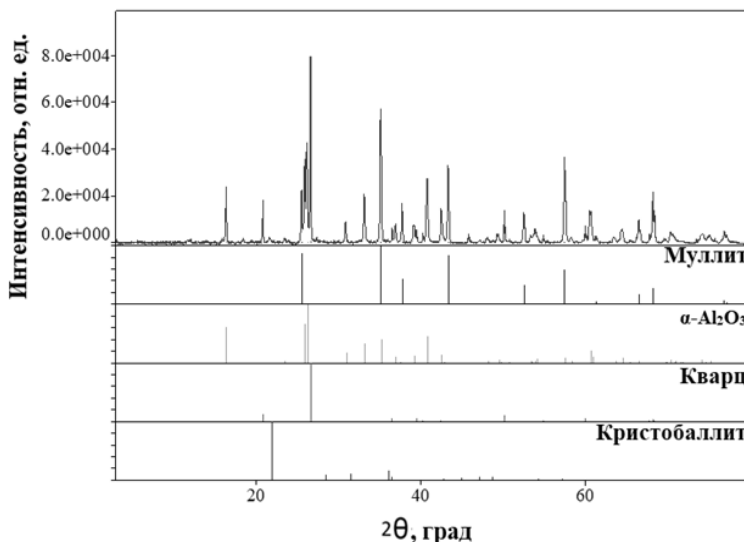


Рис. 2. Типичная рентгеновская порошковая дифрактограмма для исследованных образцов ВКВС

Дисперсность матричных компонентов литевых масс является одним из приоритетных факторов, оказывающих прямое воздействие, как на их реологическое поведение, так и на прочность готовых продуктов за счет формирования плотноупакованной системы [1, 16, 17]. Выбор оптимального зернового состава способствует экономии вяжущего, как наиболее дорогого ком-

понента. В то же время известным фактом является то, что во многих случаях избыток вяжущего компонента ухудшает качество огнеупорных бетонов. На следующем этапе исследования проведена детальная оценка гранулометрического состава экспериментальных матричных (вяжущих) систем. Полученные результаты представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

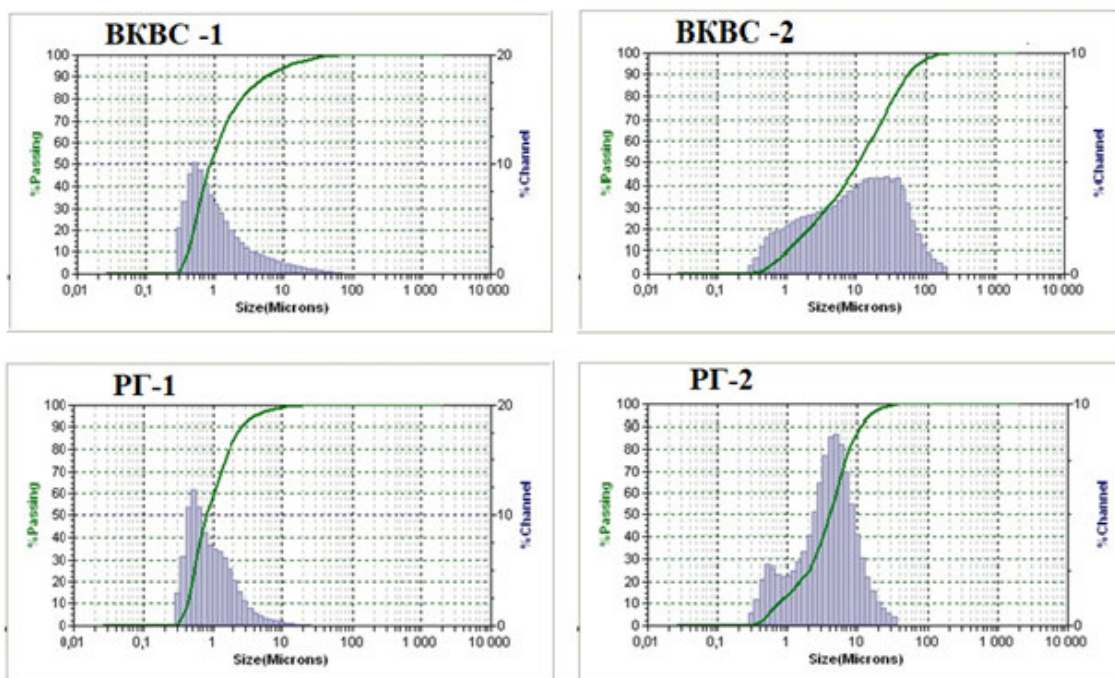


Рис. 3. Интегральные кривые и гистограммы распределения частиц в исследованных материалах

При анализе данных, представленных на рисунке 3, установлено, что образцы ВКВС-1 и РГ-1 имеют мономодальный характер распределения частиц по размерам. Максимумы мод в обоих случаях располагаются в области 0,5–0,6 мкм.

В тоже время, образец РГ-2 характеризуется ярко выраженным бимодальным зерновым рас-

пределением. Максимум первой моды соответствует 0,5 мкм, а второй – располагается в диапазоне 4,0–5,0 мкм. Что касается образца ВКВС-2, то в данном случае определение модальности несколько затруднено ввиду отсутствия четко выраженных максимумов.

Таблица 1

Гранулометрический состав твердой фазы экспериментальных ВМС

Образец	D ₂₀	D ₅₀	D ₉₀	Содержание субмикронной фракции (≤ 1 мкм), %
ВКВС-1	0,49	0,86	5,48	58,0
ВКВС-2	2,05	10,60	55,32	10,5
РГ-1	0,49	0,80	2,56	62,0
РГ-2	1,50	4,04	10,85	15,0

Установлено, что матричные системы ВКВС-1 и РГ-1 имеют сопоставимый гранулометрический состав. Это видно, в том числе, и из медианного размера частиц, который составляет соответственно 0,86 и 0,80 мкм. Содержание субмикронной фракции для обоих исследованных образцов находится в пределах 60 ± 2 %. В тоже время содержание фракции зерен с размером менее 1 мкм для ВКВС-2 и РГ-2 сравнительно невысоко и находится в пределах 10–15 %. При этом D₅₀ для образца РГ-2 более, чем в 2,5 раза ниже, по сравнению с тем же показателем у ВКВС-2, который характеризуется наиболее крупной дисперсностью из всех исследованных материалов.

Методом сканирующей электронной микроскопии выявлены особенности морфологии частиц твердой фазы экспериментальных МС (рис. 4 и 5).

Согласно данным СЭМ (рис. 4а), микроструктуру образца РГ-1 формируют первичные кристаллиты α -Al₂O₃, представляющие собой хорошо оформленные беспористые сферические зерна размером от 0,5 до 1 мкм. Частицы демонстрируют невысокую склонность к агрегации, что хорошо заметно при большом увеличении.

Частицы, слагающие образец РГ-2, можно подразделить на два морфологических типа (рис. 4б). Первый тип формируют крупные монолитные зерна призматической формы размером 10–20 мкм. Вторая группа представлена остроугольными пластинчатыми кристаллитами, размер которых варьируется в диапазоне от долей до 1–2 мкм.

В свою очередь на СЭМ-микрофотографиях образцов ВКВС-1 и ВКВС-2 также отчетливо можно дифференцировать два типа частиц (рис. 5). В обоих образцах основу высокодисперсной

фракции составляют изометричные пластины размером 1–2 мкм, которые равномерно распределены между плотными объемными кристаллитами. К особенностям таких крупных зерен следует отнести наличие характерных острых углов и сколов, образующихся в процессе измельчения

материалов. Несмотря на схожесть в морфологии, обращает на себя существенная разница в размерах частиц данного типа: для образца ВКВС-1 размер составляет порядка 3–5 мкм (рис. 5а), в то время как аналогичные зерна крупной фракции в образце ВКВС-2 достигают 10–15 мкм (рис. 5б).

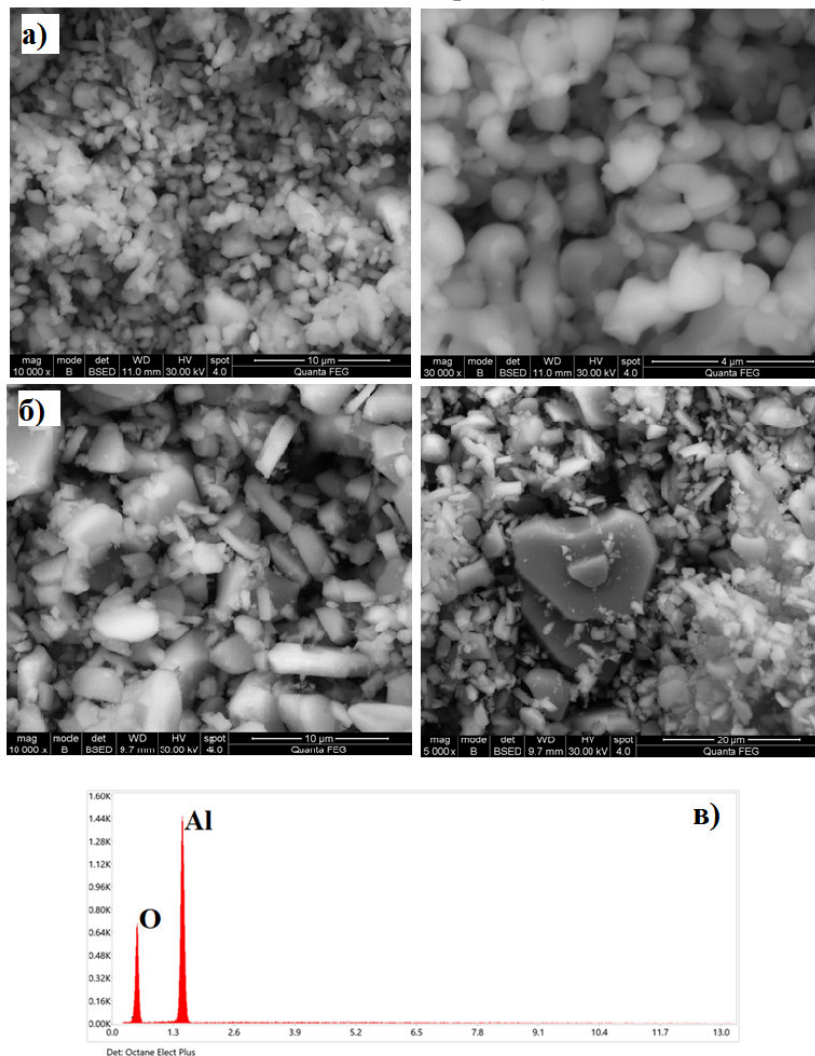


Рис. 4. СЭМ-микрофотографии образцов РГ-1 (а) и РГ-2 (б); типичный энергодисперсионный спектр для исследованных ВМС на основе реактивного глинозема (в)

Таким образом, данные СЭМ (рис. 4 и 5) хорошо согласуются с результатами определения гранулометрического состава экспериментальных образцов и наглядно подтверждают характер модальности распределения частиц в исследованных образцах. Следует отметить, что полимодальность способствует более высокой плотности упаковки, что улучшает реологические свойства литейных масс.

На энергодисперсионных спектрах для обоих исследованных образцов реактивного глинозема зафиксированы только два элемента – алюминий и кислород (рис. 4в). Исходя из полу-

ченных данных установлено, что содержание оксида алюминия для образцов РГ-1 и РГ-2 составляет более 99 масс. %.

Химический состав твердой фазы образцов ВКВС более разнообразен и включает следующие элементы (в порядке убывания): кислород (до 57 масс. %), алюминий (26–27 масс. %), кремний (12–13 масс. %), титан и железо (порядка 1,5 масс. %). Остальные элементы – натрий, магний, калий, кальций и хром встречаются в качестве примесных в количестве 0,2–0,3 масс. %. Полученные результаты по определению элементного состава хорошо согласуются с данными о минералогическом комплексе образцов.

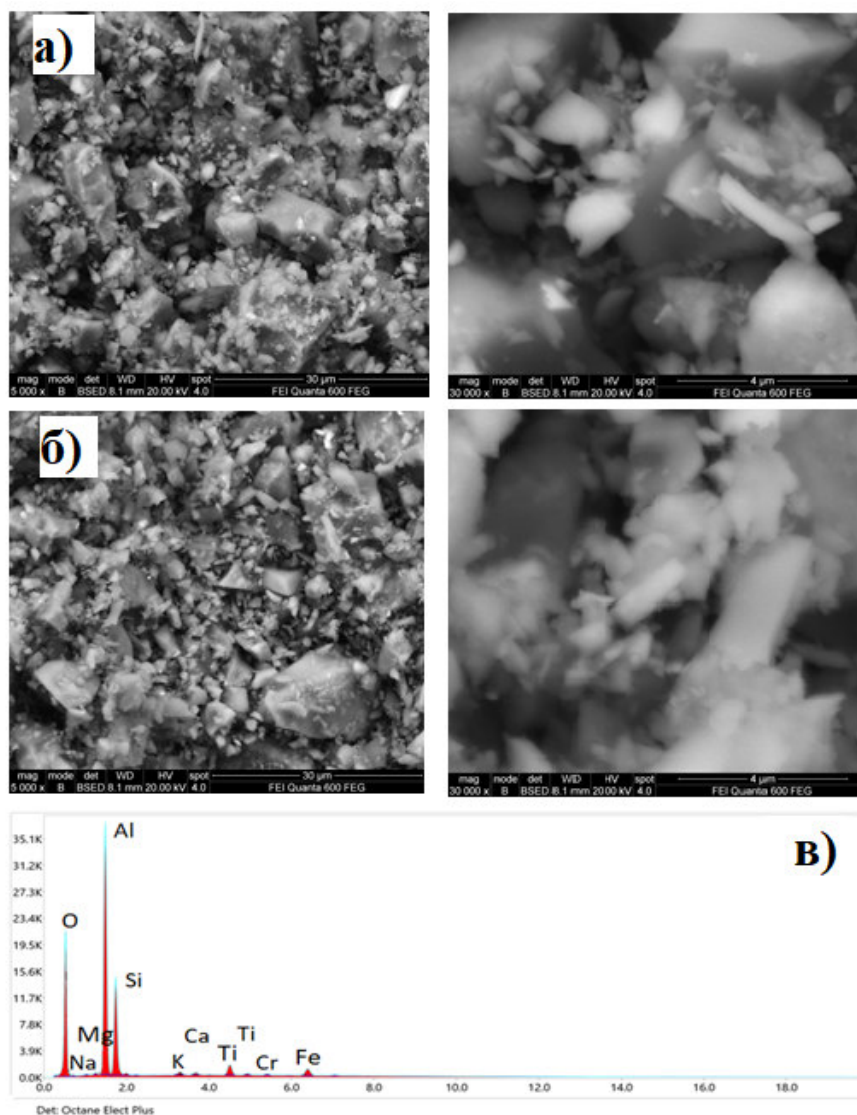


Рис. 5. СЭМ-микрофотографии образцов ВКВС-1 (а) и ВКВС-2 (б); типичный энергодисперсионный спектр для исследованных систем ВКВС (в)

Выводы. Проведено комплексное исследование вещественного состава и структурно-морфологических характеристик высокоглиноземистых тонкодисперсных матричных систем, полученных на основе отечественных импортонезависимых компонентов. Показано, что по своему фазовому составу ВМС на основе ВКВС представляет собой полифазную систему, основными компонентами которой являются: муллит, альфа-оксид алюминия и кварц. ВМС на основе реактивного глинозёма представляет собой монофазную систему, единственной фазой является альфа-оксид алюминия.

Содержание Al_2O_3 в образцах на основе РГ составляет более 99 масс. %. Химический состав твердой фазы суспензий ВКВС является полиэлементным, с преобладанием кислорода, алюминия и кремния.

Выявлено, что изученные экспериментальные образцы матричных систем имеют сопоставимый гранулометрический состав. Образцы

ВКВС-1 и РГ-1 характеризуются мономодальными зерновым распределением и медианным размером частиц в районе 0,8–0,9 мкм. Образцы ВКВС-2 и РГ-2 имеют более крупный медианный размер частиц; порядка 10 и 4 мкм соответственно. При этом для суспензии РГ-2 характерно ярко-выраженное бимодальное распределение частиц, в то время как для ВКВС-2 определение модальности затруднено.

Установлено, что микроструктура образца РГ-1 принципиально отличается от других исследованных материалов, поскольку сформирована только одним морфологическим типом частиц – плотными беспористыми сферическими кристаллами $\alpha-Al_2O_3$ примерно одного размера. Для всех остальных матричных систем в микроструктуре отчетливо визуализируются два типа зерен: крупные остроугольные монолитные призматические кристаллиты (размером от 3–5 мкм и более) и изоморфные пластинчатые кристаллиты (до 1–2 мкм).

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке технологичной и стабилизированной на коллоидно-химическом уровне матричной системы смешанного типа, успешно сочетающей основные преимущества ВМС на основе ВКВС и реактивного глинозема.

Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры. Т. 1. М.: Теплоэнергетик, 2003. 448 с.
2. ГОСТ 34470-2018. Бетоны огнеупорные. М.:Стандартинформ, 2018. 12 с.
3. Luz A.P., Braulio M.A.J., Pandolfelli V.C. Refractory Castable Engineering. GollerVerlagGmbH, Baden-Baden, Germany, 2015. 734 p.
4. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.:Высшая школа, 1980. 472 с.
5. Пивинский Ю.Е. Керамические и огнеупорные материалы: избр. тр. Т. 2. СПб.: Стройиздат СПб. 2003. 668 с.
6. Пивинский Ю.Е., Трубицын М.А. Огнеупорные бетоны нового поколения. Общие характеристики вяжущих систем // Огнеупоры. 1990. № 12. С. 1–8.
7. Ghose S., Saigal C., Maldhure A., Das S.K. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable // Trans. Indian Ceram. Soc. 2013. Vol. 72. № 2. Pp. 113–118.
8. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kuzin V. I., Zubashchenko R. V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 1. Methods for preparing reactive alumina // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. Pp. 130–136. DOI: 10.1007/s11148-022-00694-w
9. Gürelib S.B., Altunib A. Reactive alumina production for the refractory industry // Powder Technology. 2009. Vol. 196. P. 115–121. DOI:10.1016/j.powtec.2009.07.007.
10. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 2. Efficiency of preparing finely dispersed aluminium oxide powder using a ball mill // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. № 2. Pp. 137–142. DOI:10.1007/s11148-022-00695-9
11. Ban T., Okada K., Hayashi T., Otsuka N. Mechanochemical effects for some Al₂O₃ powders of dry grinding // Journal of materials science. 1992. №27. Pp. 465–471.
12. Reid C.B., Forrester J., Goodshaw H.J., Suaning G.J. Study in the mechanical milling of alumina powder // Ceramics International. 2008. Vol. 34. №6. Pp. 1551–1556
13. Пивинский Ю.Е., Гришпун Е.М., Гороховский А.М. Разработка технологий, производство и служба формованных и неформованных огнеупоров на основе ВКВС // Новые огнеупоры. 2015. №5. С. 29–39. DOI:10.17073/1683-4518-2015-5-29-39
14. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Остряков Л.В. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 12. ВКВС композиционного состава (боксит, электрокорунд, кварцевое стекло) и некоторые свойства материалов на их основе // Новые огнеупоры. 2017. № 10. С. 15–21. DOI:10.17073/1683-4518-2017-10-15-21.
15. Онищук В.И., Месяц М.В., Евтушенко Е.И., Дороганов В.А. Особенности высококонцентрированных вяжущих суспензий на основе керамических материалов и силикатных стекол // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 10. С. 21–26.
16. Sarkar R. Particle Size Distribution for Refractory Castables: A Review // Interceram - International Ceramic Review. 2016. Vol. 65. Pp. 82–86. DOI:10.1007/BF03401156
17. Kiennemann J., Chabas E., Ulrich C., Dumont D. The role of granulometry and additives in optimising the alumina matrix in low cement castables // Refractories WORLDFORUM 9. 2017. Pp.77–82.

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Воловичева Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Фурда Любовь Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии E-mail: furda@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Курбатов Аким Петрович, студент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. E-mail: 1519471@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Лисняк Виктория Владимировна, аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Поступила 15.08.2023 г.

© Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В., 2023

**Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kurbatov A.P., Lisnyak V.V.*

Belgorod National Research University

**E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

INVESTIGATION OF THE MATERIAL COMPOSITION AND STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TWO TYPES OF HIGH-ALUMINA MATRIX (BINDER) SYSTEMS

Abstract. *The results of a comprehensive study of the material composition and structural and morphological characteristics of two types of high-alumina matrix systems, obtained entirely on the basis of domestic components - high-alumina highly concentrated suspension of ceramic binder (HCBS) and suspension based on reactive alumina (RA), are presented. The objects of study are four samples of experimental high-alumina matrix systems (HMS), comparable in particle size distribution. According to the results of X-ray phase analysis, HMS based on reactive alumina are characterized by the content of the α - Al_2O_3 phase of more than 99 %, while the samples of HCBS are polyphase with a predominance of mullite, alpha-alumina and quartz in the mineral complex. The nature of the distribution of particles in the studied samples is different: both monomodal HMS with a narrow distribution of particles and a median size of about 0.8 μm , and bimodal HMS with a median size of 4 μm or more are presented. The content of the submicron fraction (particle size less than 1 micron) varies from 10–15 % to 60 %. Using scanning electron microscopy, the features of the microstructure were revealed and the morphology of the particles of the solid phase of HMS of both types is studied in detail. Using X-ray microanalysis, the chemical (elemental) composition of the studied materials is established.*

Keywords: *refractory castables, ceramic castables, low-cement castables, matrix systems, suspensions, reactive alumina, dispersion, scanning electron microscopy.*

REFERENCES

1. Pivinskij Yu.E. Unformed refractories [Неформованные огнеупоры]. Vol. 1. M.: Teploenergetik, 2003. 448 p. (rus)
2. GOST 34470-2018. Refractory concretes [Бетон огнеупорный]. M.: Standartinform, 2018. 12 p. (rus)
3. Luz A.P., Braulio M.A.J., Pandolfelli V.C. Refractory Castable Engineering. Goller Verlag GmbH, Baden-Baden, Germany, 2015. 734 p.
4. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials [Химическая технология вяжущих материалов]. M.: Vysshaya Shkola, 1980. 472 p. (rus)
5. Pivinskij Yu.E. Ceramic and refractory materials: selected works [Керамические и огнеупорные материалы: избр. тр.] T. 2. SPb.: Strojizdat SPb. 2003. 668 p. (rus)
6. Pivinskij Yu.E., Trubicyn M.A. Refractory concretes of the new generation. General characteristics of binding systems [Огнеупорные бетонные системы]. M.: Mashinostroyeniye, 1990. No. 12. Pp. 1–8. (rus)
7. Ghose S., Saigal C., Maldhure A., Das S. K. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable. Trans. Indian Ceram. Soc. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 113–118.
8. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.B., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 1. Methods for preparing reactive alumina. Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. Pp. 130–136. DOI:10.1007/s11148-022-00694-w
9. Gürelib S. B., Altunib A. Reactive alumina production for the refractory industry. Powder Technology. 2009. Vol. 196. Pp. 115–121. DOI:10.1016/j.powtec.2009.07.007.
10. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Research in the area of preparing activated alumina. Part 2. Efficiency of preparing finely dispersed aluminium ox-

ide powder using a ball mill. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022. Vol. 63. No 2. Pp. 137 – 142. DOI:10.1007/s11148-022-00695-9.

11. Ban T., Okada K., Hayashi T., Otsuka N. Mechanochemical effects for some Al₂O₃ powders of dry grinding. *Journal of materials science*. 1992. No. 27. Pp. 465–471.

12. Reid C.B., Forrester J., Goodshaw H.J., Suaning G.J. Study in the mechanical milling of alumina powder. *Ceramics International*. 2008. Vol. 34. No 6. Pp. 1551–1556.

13. Pivinskij Yu.E., Grishpun E.M., Gorohovskij A.M. Technology development, production and service of molded and unformed refractories based on HCBS [Razrabotka tehnologij, proizvodstvo i sluzhba formovannyh i neformovannyh ogneuporov na osnove VKVS]. *New refractories*. 2015. No. 5. Pp. 29–39. DOI:10.17073/1683-4518-2015-5-29-39 (rus)

14. Pivinskij Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V. Research in the field of production of molded and unformed refractories based on high-alumina HCBS. Part 12. HCDS of composite composition (bauxite, electrocorundum, quartz glass) and some

properties of materials based on them [Issledovaniya v oblasti polucheniya formovannyh i neformovannyh ogneuporov na osnove vysokoglinozemistyh VKVS. Chast' 12. VKVS kompozicionnogo sostava (boksit, elektrokorund, kvarcevoe steklo) i nekotorye svojstva materialov na ih osnove]. *New refractories*. 2017. No. 10. Pp. 15–21. DOI:10.17073/1683-4518-2017-10-15-21 (rus)

15. Onishchuk V.I., Mesyac M.V., Evtushenko E.I., Doroganov V.A. Features of highly concentrated binding suspensions based on ceramic materials and silicate glasses [Osobennosti vysokokontsentrirannyh vyzhushchih suspenzij na osnove keramicheskikh materialov i silikatnyh stekol]. *New refractories*. 2014. No. 10. Pp. 21–26. (rus)

16. Sarkar R. Particle Size Distribution for Refractory Castables: A Review. *Interceram - International Ceramic Review*. 2016. Vol. 65. Pp. 82–86. DOI: 10.1007/BF03401156

17. Kiennemann J., Chabas E., Ulrich C., Dumont D. The role of granulometry and additives in optimising the alumina matrix in low cement castables. *Refractories WORLDFORUM* 9. 2017. Pp.77–82.

Information about the authors

Trubitsin, Mikhail A. PhD, Professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Volovicheva, Natalya A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda, Lyubov V. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Kurbatov, Akim P. Student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: 1519471@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Lisnyak, Viktoriya V. Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 15.08.2023

Для цитирования:

Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Курбатов А.П., Лисняк В.В. Исследование вещественного состава и структурно-морфологических характеристик двух типов высокоглиноземистых матричных (вяжущих) систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 93–101 DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101

For citation:

Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Kurbatov A.P., Lisnyak V.V. Investigation of the material composition and structural and morphological characteristics of two types of high-alumina matrix (binder) systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 10. Pp. 93–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-93-101