

**ФИЗИКО-ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ БУРОВЫХ ШЛАМОВ
МЕТОДАМИ СВ-СИНТЕЗА И МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ**

Гуляев Павел Юрьевич

*доктор технических наук,
независимый исследователь,*

Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru

ORCID: 0000-0002-4337-1253

SPIN: 3808-0739

Мансуров Данил Андреевич

стажер-исследователь,

ООО ТК «Сибирский регион»

Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: mansurovd02@mail.ru

SPIN: 1799-3415

Цель исследования: изучение физико-химических особенностей процессов переработки ультрадисперсной части бурового шлама в жаропрочные материалы с высокими огнеупорными свойствами.

Методы и объекты исследования: методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в сочетании с предварительной механохимической активацией бурового шлама на высокоэнергетической планетарной мельнице АГО-3, которую применяют, когда необходимо очистить отходы бурения от нефтепродуктов, получен композиционный огнеупор, устойчивый к деформациям от 30 до 80 МПа, при температурах от 1500 до 1660°C.

Основные результаты исследования: показано, что физико-механические свойства обеспечиваются игольчатой структурой муллитокорундовой связки.

Ключевые слова: буровой шлам, переработка, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, огнеупорный материал, муллит, алюмотермия.

**PHYSICO-CHEMISTRY OF DRILLING WASTE PROCESSING
BY SH-SYNTHESIS AND MECHANOCHEMICAL ACTIVATION METHODS**

Pavel Yu. Gulyaev

*Doctor of Technical Sciences,
Independent Researcher*

Khanty-Mansiysk, Russia

ORCID: 0000-0002-9909-7337

SPIN: 3808-0739

E-mail: P_Gulyaev@ugrasu.ru

Danil A. Mansurov

trainee researcher,

ООО ТК Siberian Region

Khanty-Mansiysk, Russia

SPIN: 1799-3415

E-mail: mda111002@edu.ugrasu.ru

Purpose of research: is to study the physicochemical features of the processes of processing the ultrafine part of drill cuttings into heat-resistant materials with high refractory properties.

Methods and objects of research: using the methods of self-propagating high-temperature synthesis in combination with preliminary mechanochemical activation of drill cuttings on a high-energy planetary mill AGO-3, which is performed only in those cases when it is necessary to clean drilling waste from oil products, a composite refractory was obtained that is resistant to deformations from 30 to 80 MPa, at temperatures from 1500 to 1660°C.

Main results of research: it is shown that the physical and mechanical properties are provided by the needle-like structure of the mullite-corundum binder.

Keywords: drilling waste, processing, self-propagating high-temperature synthesis, refractory material, mullite structures, aluminothermy.

Введение

В настоящее время только в ХМАО-Югре образуется до 600 тысяч тонн отходов нефтедобычи в год, основная часть которых – буровой и нефтяной шлам [1]. При этом ежегодный объем увеличения бурового шлама (БШ) на территории Западной Сибири оценивается величиной не менее чем 100 тысяч тонн [2]. Для его утилизации сооружаются земляные емкости, так называемые шламовые амбары – шламонакопители, которые считаются одними из опасных источников загрязнения [3]. Переработка буровых шламов в сухие строительные смеси или алюмосиликатные материалы со специальными свойствами является не только важной задачей утилизации отходов нефтедобывающей отрасли [4, 5], но и экономически выгодным путем производства конкурентоспособных неформованных огнеупоров широкого применения непосредственно на месте [6–8], избегая затрат на транспортировку в удаленные районы. Сырьевая база для такого производства практически неограниченна. Около 10% объема БШ представляет собой особо ценную часть ультрадисперсной фракции бурового раствора, которая содержится в приповерхностном слое шламонакопителя.

Цель работы – продемонстрировать возможность импортозамещения дорогостоящих ультрадисперсных порошков муллитокорундовой группы при производстве огнеупорных материалов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) за счёт использования отечественного сырья в виде мелкой фракции БШ, который в промышленных масштабах накапливается в приповерхностном слое шламовых амбаров из-за естественной седиментации выбуренной породы. В этом аспекте рассмотрены особенности применения оригинальных методов сухой очистки отжатых БШ из насыпей кустовых площадок от остатков углеводородов с помощью цеолита и примеры металлотермического синтеза огнеупоров из смеси БШ с порошками алюминия.

Результаты и обсуждение

Физико-механические свойства и состав бурового шлама

Особую ценность БШ, в отличие от многих других отходов промышленности, придает тот факт, что они сами являются продуктом высокотехнологической переработки горных пород, которые в процессе бурения размельчают и выносят на поверхность в виде смеси отработанного бурового раствора и выбуренной породы. К уникальным физико-химическим свойствам БШ, в первую очередь, следует отнести его тонкодисперсный состав и чрезвычайно высокую удельную поверхность частиц твердой фазы, что определяет хорошую кинетику протекания гетерогенных восстановительно-окислительных реакций, каталитические и вяжущие свойства. Обратная сторона этих свойств БШ сопряжена со слабой фильтрационной способностью, бесструктурностью, заплыванием при увлажнении. При щелочном насыщении катионами Na^+ большинство БШ обладают непрочной структурой, а при увлажнении – расплываются в непроницаемую для воды и воздуха вязкую массу, которая после высыхания

резко сокращается в объеме, образуя трещины и плохо поддающиеся обработке монолитные глыбы. На рисунке 1 приведено распределение частиц твердой фазы БШ после 6 месяцев хранения.

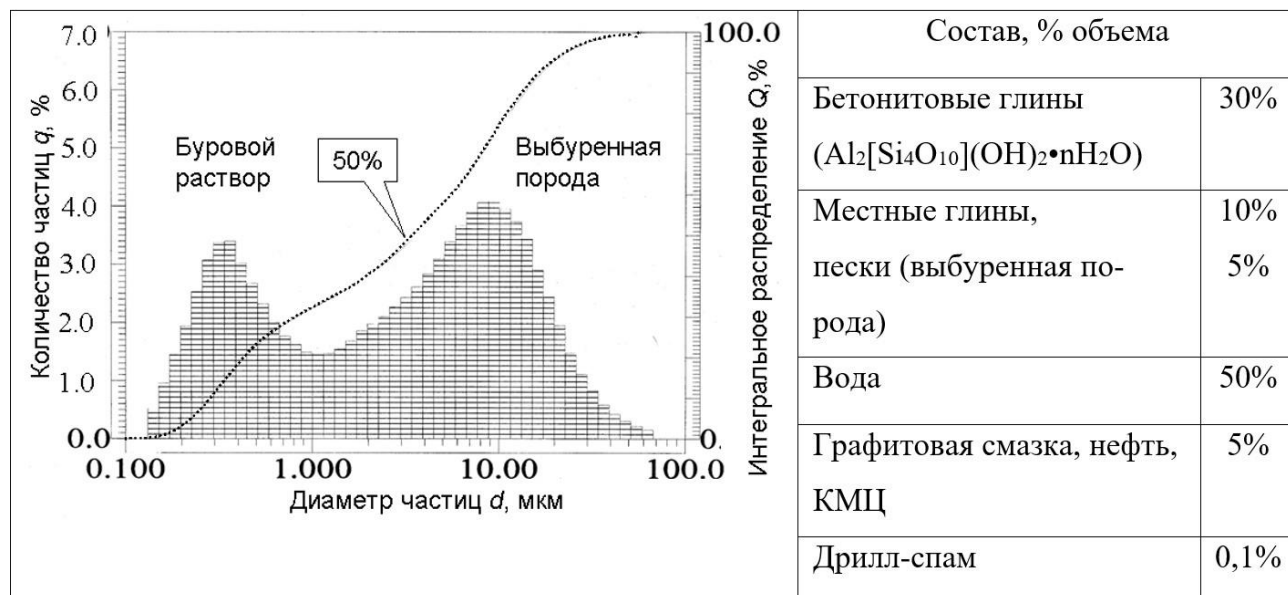


Рисунок 1 – Дисперсионный состав БШ месторождения Каменное, входящего в состав Красноленинского свода месторождений на западе Ханты-Мансийского автономного округа

Анализ дисперсионной кривой, полученной на лазерном анализаторе гранулометрического состава LA-300 («Hogiba», Япония), выявил две моды распределения, соответствующие ультрадисперсным частицам бурового раствора (350 нм) и микрочастицам выбуренной породы (10 мкм). Следует отметить, что мельчайший размер частиц отработанного бурового раствора обеспечивает их высокую седиментационную стабильность и преимущественное накопление в верхних слоях шламового амбара. Этим объясняется фактическое совпадение гранулометрического состава приповерхностного слоя БШ (см. на рис.1) с типичным составом буровых растворов по стандартам Американского нефтяного института (АНИ) для низкого реологического профиля, приведенном на рисунке 2 [6].

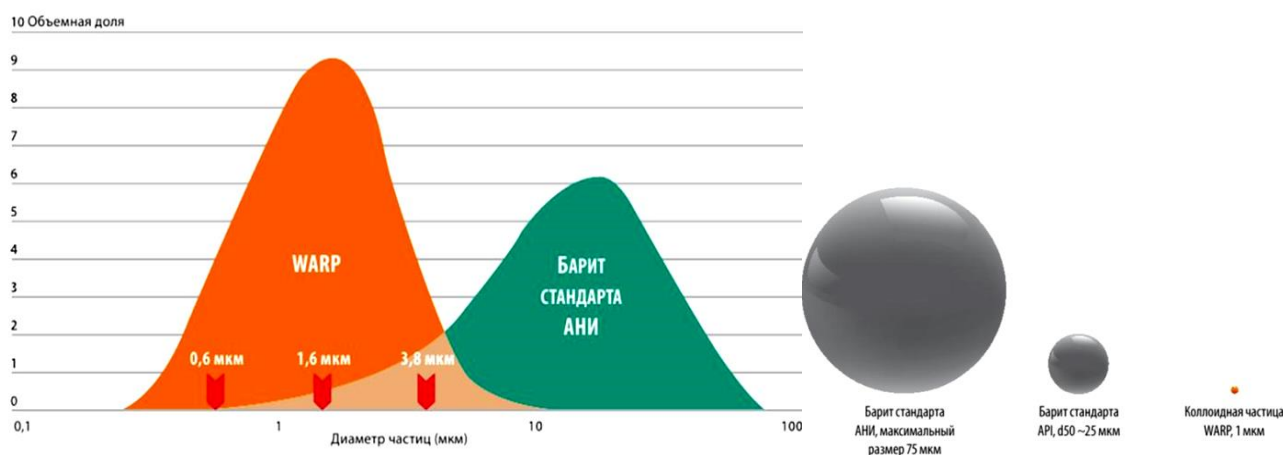


Рисунок 2 – Типичный гранулометрический состав буровых растворов WARP, производимых компанией Mi Swaco группы «Шлюмберже» (SLB: NYSE)

Вместе с тем, нельзя игнорировать вариабельность состава компонентов буровых отходов в шламонакопителях, зависящую от геологических особенностей грунтов в местах разработки месторождения. Для рассматриваемого нами способа переработки БШ в муллитовые огнеупоры особенно важно соотношение массовой доли Al_2O_3 к SiO_2 . Это необходимо для поддержания заранее заданного муллито-корундового соотношения в конечном продукте синтеза, для чего на этапе подготовки исходной смеси реагентов приходится вычислять массовую долю вносимой добавки порошка алюминия. Изменение характерного химического состава БШ, в зависимости от региона нефтедобычи, приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав (г/кг) буровых шламов в разных регионах РФ [2]

Химический элемент или вещество	Регион		
	Западная Сибирь	Субарктическая зона Западной Сибири	Северо-Европейская часть РФ
Оксид Натрия	13,2	6	-
Оксид Калия	22,9	12	23,3
Оксид Магния	25,4	11,5	-
Оксид Кальция	10,1	11	57,5
Оксид Алюминия	192	88,1	131,6
Оксид Кремния	563	310,8	176,5
Оксид Фосфора	1,6	0,4	27
Сера	0,6	4	41
Оксид титана	10,3	4,3	9,6
Оксид Марганца	1,3	0,3	1,6
Оксид железа	82,7	33,9	75,2
Никель	0,1	0,036	0,4
Цинк	0,12	0,16	0,3
Хром	0,091	0,06	0,5
Свинец	0,024	-	-
Медь	-	0,018	2,1
Стронций	0,17	0,1	0,4
Цирконий	0,19	0,08	-
Барий	0,56	7,8	-
Хлорид	0,11	0,22	-
Вода	64,7	380	258
Органика	16,9	134	149

Соотношение массовой доли (г/кг) Al_2O_3 к SiO_2 в составе буровых шламов показано на рисунке 3.

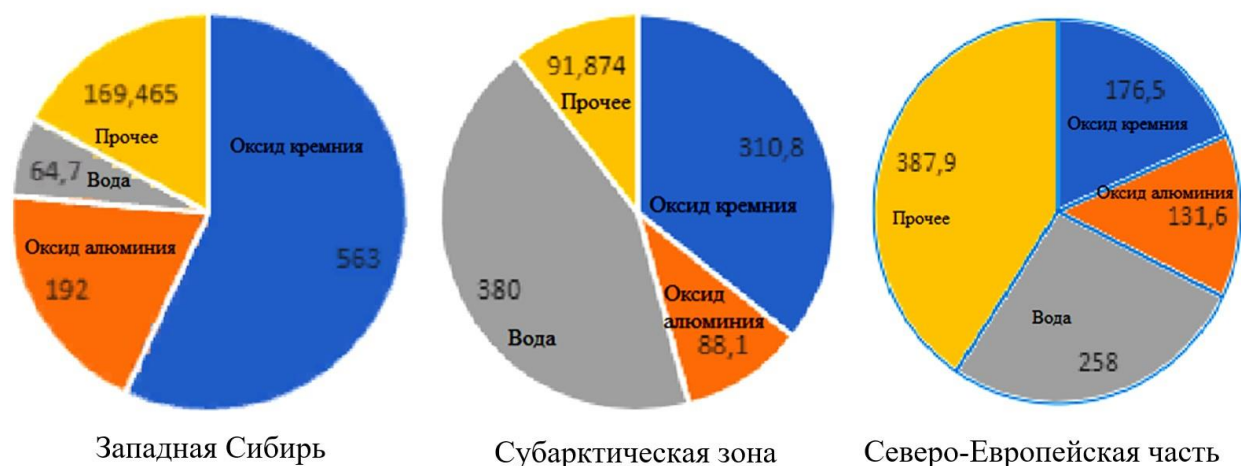
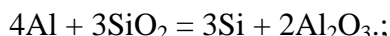


Рисунок 3 – Соотношение Al_2O_3 : SiO_2 в составе буровых шламов для различных регионов

Теория синтеза огнеупоров из бурового шлама

В основе рассматриваемых методов переработки БШ в огнеупорные материалы лежат хорошо изученные алюминотермические процессы формирования муллитовой связки при высокотемпературном спекании компонентов шихты на основе корундового наполнителя (Al_2O_3) и тонкодисперсного глинозема, в нашем случае его источниками являются бетонитовые глины ($\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) и выбуренная порода, входящие в состав БШ [4, 7]. Процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) алюмосиликатных огнеупоров проходит в две стадии:

- первая стадия «восстановительная» начинается при низких температурах T_0 , но выше температуры плавления Al (легкоплавкого компонента)



- вторая «экзотермическая» стадия высокотемпературного синтеза проходит с выделением тепла и образованием конечного керамического материала на основе муллитовых структур при адиабатических температурах T_{ad} выше 1500°C



Уравнение теплового баланса для реакции образования двух конечных продуктов Al_4Si_3 и $3\text{Al}_2\text{O}_3$ можно записать в виде:

$$[h(T_{ad}) - h(T_0)]_{P1} + [h(T_{ad}) - h(T_0)]_{P2} = Q, \quad (2)$$

где: P_1 и P_2 первый и второй продукт реакции соответственно; h – энтальпия; Q – тепловой эффект в волне горения СВС.

При условии полноты протекания реакции (1) для указанного стехиометрического состава шихты можно рассчитать теоретическое значение адиабатической температуры синтеза:

$$T_{ad} = T_0 + \frac{Q_{eff}}{c^*} \quad (3)$$

$$Q_{eff} = Q - \sum_{i=0}^n L_{ph}^i \quad (4)$$

$$c^* = (T_{ad} - T_0)^{-1} \int_{T_0}^{T_{ad}} c(T) dT \quad (5)$$

где: Q – теплота образования продукта при T_0 ; C – теплоёмкость продукта; Q_{eff} – суммарный тепловой эффект реакции СВС; C^* – средневзвешенное значение теплоёмкости продуктов реакции; L_{ph}^i – теплота i -го фазового перехода в продукте при $T_{ph}^i < T_{ad}$; L_{ph} и μ_{ph} – соответственно, теплота фазового перехода и доля высокотемпературной фазы в продукте горения при $T_{ad} = T_{ph}$; n – количество фазовых переходов в интервале $T_0 < T < T_{ad}$.

Расчетная адиабатическая температура СВ-синтеза для стехиометрического состава в реакции (1), выполненная согласно уравнениям (2) – (5), составила 1727°C при условии равенства значения начальной температуры $T_0 = 660^\circ\text{C}$, что соответствует точке плавления Al.

Экспериментальные технологии переработки бурового шлама

Преимущество рассматриваемого метода переработки буровых шламов в огнеупорные материалы состоит в том, что единственной принципиально нужной добавкой является небольшое количество недорогого алюминиевого порошка, необходимого для инициирования экзотермической реакции синтеза по формуле (1), которая в соответствии с уравнениями (2)–(5) должна выходить на устойчивый и самоподдерживающийся режим горения [15]. На практике, ввиду неадиабатичности реального процесса синтеза, естественным является возникновение теплотерь при распространении волны горения в открытом пространстве, что характерно для многих методов внепечной металлургии и обычно легко компенсируется дополнительным локальным прогревом поверхности образца с помощью маломощного и мобильного

источника тепла [10, 11], такого как газопламенная или плазменная горелка с контролируемой температурой факела [13, 14]. Дополнительно при этом формируется жаропрочный поверхностный слой [8]. Учитывая все вышесказанное, нами на начальном этапе разработки экспериментальной технологии переработки БШ для синтеза муллитовых огнеупоров использовалась электропечь типа ПВК-1,6-5 с максимальной температурой нагрева 1600 °С, а в качестве добавки – порошок ПА-4 (ГОСТ 6058-73). Пробоподготовку и предварительную очистку БШ от загрязнения нефтепродуктами проводили по «сухой» технологии, основные этапы которой показаны на рисунке 4, где 1 – буровой шлам из месторождения Каменное (ХМАО-Югра); 2 – сухой порошок бурового шлама после 4 часов обработки в вакуумном сушильном шкафу ШСВ-65 при 125 °С и остаточном давлении 10 миллиметров ртутного столба; 3 – сухой порошок БШ после 10 минут механоактивации в высокоэнергетической планетарной мельнице АГО-3 в смеси с 10% добавкой клиноптилолита $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, сорбирующей остатки нефтепродуктов; 4 – реакционная шихта: смесь БШ и ПА-4 для приготовления шликерной массы; 5 – спеченные в печи образцы муллитовой огнеупорной керамики; справа на рис. 4 приведены графики температурных режимов синтеза в электропечи ПВК-1,6.

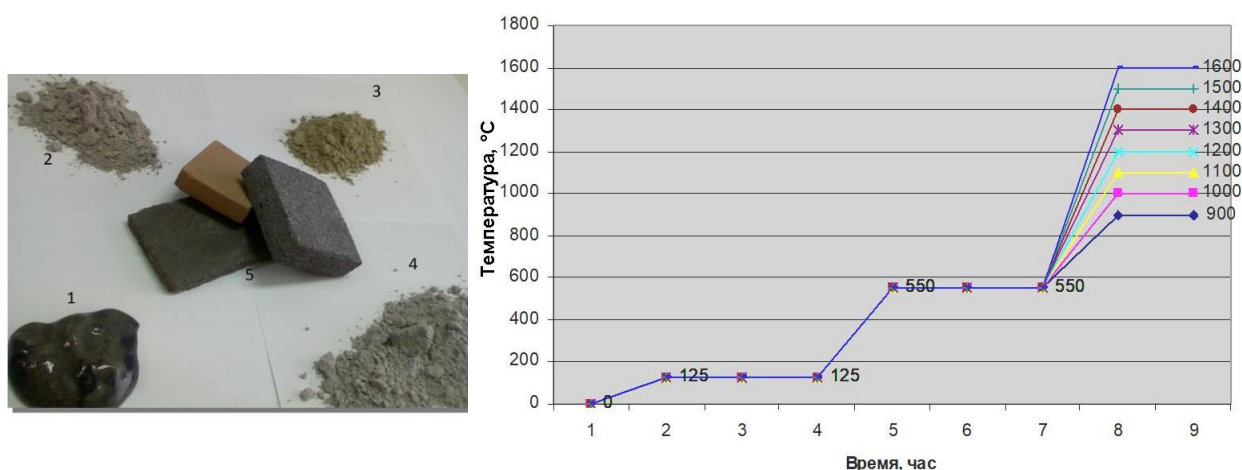


Рисунок 4 – Основные стадии переработки БШ в сухие смеси (слева) и температурные режимы нагрева в процессе сушки, отжига и синтеза огнеупора (справа)

Как было указано ранее, на температуре 125 °С производилась вакуумная сушка БШ в шкафу ШСВ-65, далее в печи ПВК-1,6 при температуре 550 °С проходил отжиг связанной воды из алюмосиликатов, а затем проходил синтез с разными начальными температурами T_0 , которые повышалась от 900 °С для первой партии до 1600 °С. По завершению последнего участка программируемого нагрева охлаждение образцов проходило в соответствии со штатным режимом охлаждения печи. На рисунке 5 показано, как с повышением температуры обжига выше 1300 °С меняется цвет спеченных образцов от коричневого до белого, что свидетельствует об интенсивном формировании муллитовых структур в материале.

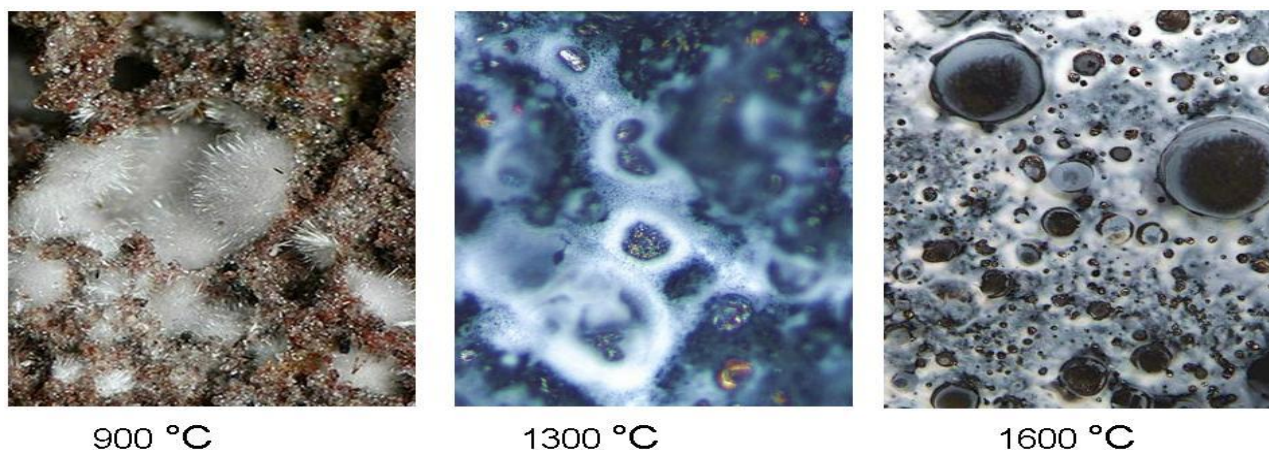


Рисунок 5 – Визуальные отличия цвета и структуры поверхности образцов огнеупорных покрытий при увеличении температуры обжига

Процессы эволюции фрагментарной структуры муллитовых огнеупорных материалов при росте температуры синтеза (а), а также результаты оптической (б) и сканирующей электронной микроскопии (в) приведены на рисунках 6–8. Детальный рентгеноструктурный анализ продуктов отражен на вставках (г).

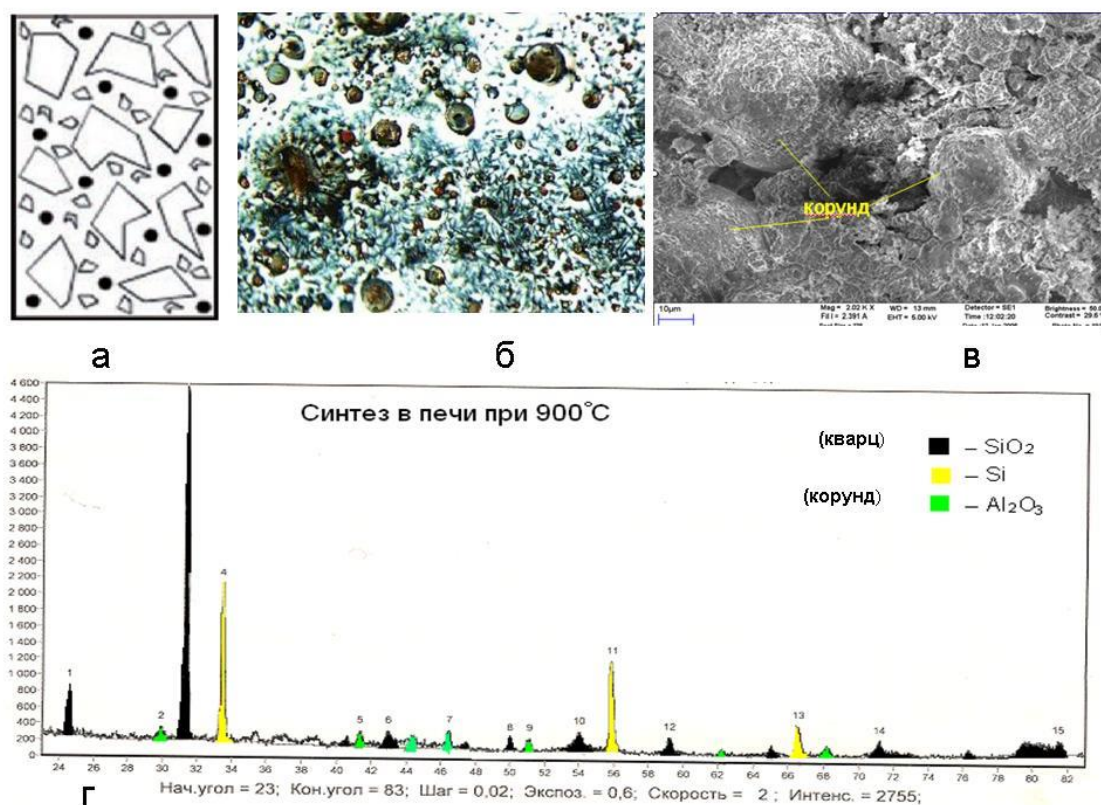


Рисунок 6 – Структура и фазовый состав огнеупора при температуре синтеза 900 °C

Для образца, полученного синтезом в печи при температуре 900 °C, характерна структура полифракционного наполнителя без керамической связки [4]. Такая структура может придавать материалу высокую термостойкость при слабой прочности и низкотехнологические свойства формовки готового изделия.

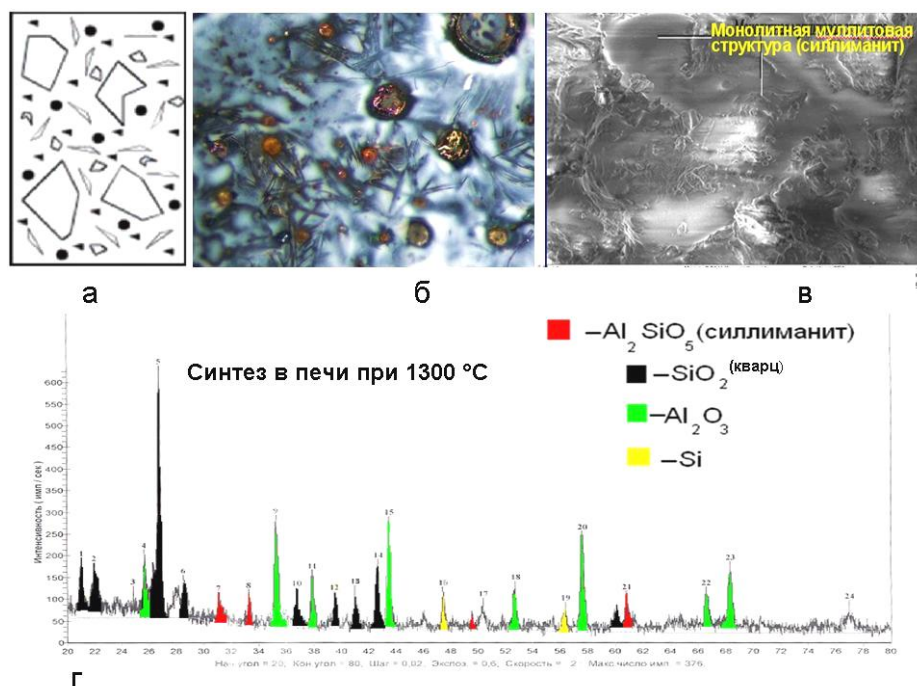


Рисунок 7 – Структура и фазовый состав огнеупора при температуре синтеза 1300 °С

На рисунке 7 можно наблюдать появление структуры и фазового состава классического муллиткорундового огнеупора, о чем говорят данные рентгеноструктурного анализа. Такой огнеупор имеет повышенный уровень термостойкости (крупные блоки) и хорошо переносит высокотемпературную деформацию («игольчатые» элементы), но при этом обладает умеренной прочностью. Одновременное наличие крупнозернистого наполнителя, в виде монолитных муллитов или корундовых зерен с размерами от 0,1 до 3,0 мм и нитевидных игольчатых кристаллов муллита длиной от 5 до 30 мкм, обеспечивает сохранность общего тугоплавкого каркаса при возникновении термонапряжений, а распространение трещин в мелкозернистой керамической связке будет останавливаться на границах крупных зерен и пор.

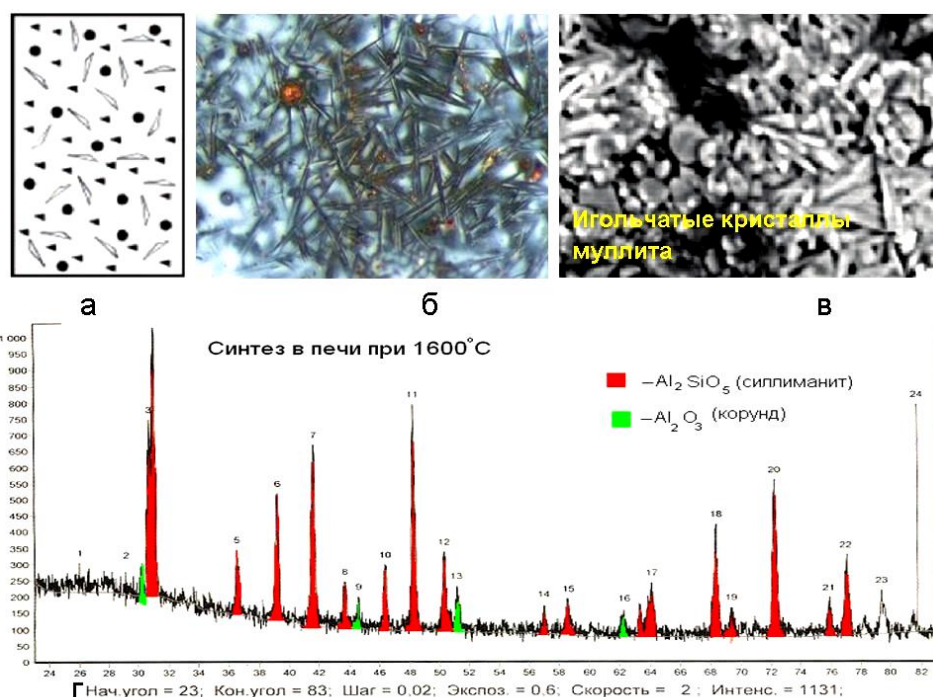


Рисунок 8 – Структура и фазовый состав огнеупора при температуре синтеза 1600 °С

На рисунке 8 можно наблюдать появление «игольчатой» структуры керамической связки муллитокорундового состава, о чем говорят данные рентгеноструктурного анализа. Это позволяет сделать вывод о повышенной прочности и снижении влияния на материал высокотемпературных деформаций при возможном анизотропном уменьшении термостойкости.

В результате исследований структуры и фазового состава огнеупоров, полученных методом СВС из БШ, путем введения добавки Al было показано, что при изменении режима термохимической обработки T_0 от 900°C до 1600°C наблюдается эволюция микроструктуры от «рыхлой» блочной системы полифракционных зерен муллита или корунда до мелкозернистой «игольчатой» структуры муллита, которая будет способствовать уменьшению прочности связи между зернами наполнителя и кристаллами керамической связки. С точки зрения жаропрочности, наилучшим является «промежуточная» структура огнеупора, мелкие «игольчатые» частицы которого будут располагаться вместе с керамической связкой между крупными зернами [19]. Если ставить целью достижения наивысших значений термостойкости, то выбор состава шихты необходимо осуществлять по диаграмме состояния системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ [12], приведенной на рисунке 9.

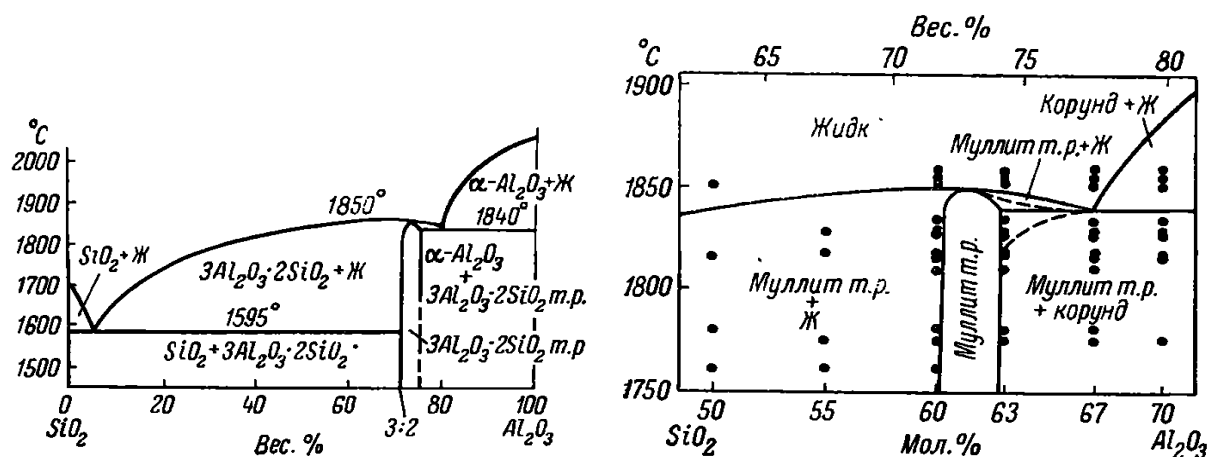


Рисунок 9 – Диаграмма состояния системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ (слева) и область диаграммы для соотношения химического состава от $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ до $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (справа) [12]

Согласно диаграмме состояния на рис. 9, образующийся муллит характеризуется конгруэнтным плавлением и кристаллизацией расплавов, при этом температура эвтектики между корундом и твердыми растворами муллита при содержании 79 мас. % Al_2O_3 составляет 1850 °C.

Важную особенность такого взаимодействия отражают кривые плавления, приведенные на рисунке 10 [4].

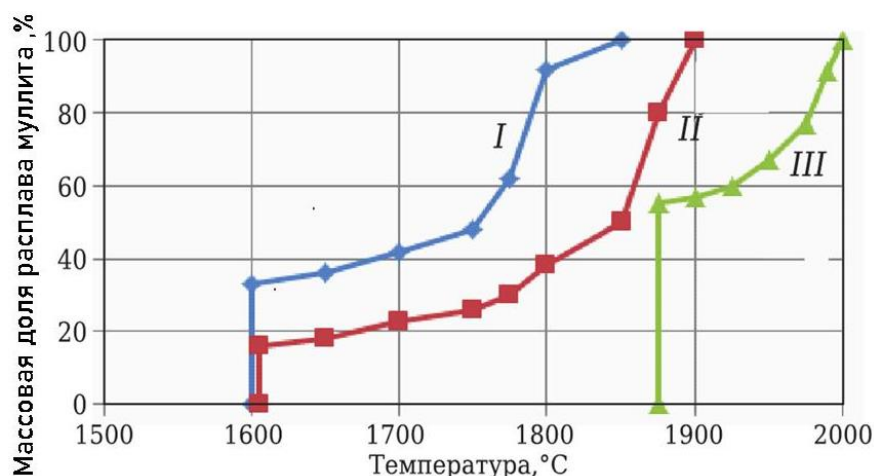


Рисунок 10 – Кривые плавления различных типов муллитов [4], в зависимости от стехиометрического соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$, равного 1 : 1 (I), 6 : 4 (II) и 9 : 1 (III)

При содержании корунда более 75,0% массовой доли в таких материалах жидкая фаза не должна появляться до 1850 °С, а следовательно такие огнеупоры могут обеспечивать большую устойчивость к высокотемпературным деформациям [20].

На рисунке 11 показаны некоторые экспериментальные образцы формованных огнеупорных изделий, полученных переработкой БШ в муллитокорундовую высокотемпературную и жаропрочную керамику.



Рисунок 11 – Образцы огнеупоров, полученные методом СВ-синтеза из БШ

Видно, что исходная шликерная масса у всех представленных образцов спеченных огнеупоров обладает хорошими технологическими свойствами для формовки готовых изделий.

Заключение и выводы

В ходе проведения исследования было замечено, что теоретически максимальное значение адиабатической температура СВ-синтеза 1730°С действительно наблюдается при добавлении массовой доли алюминия к содержащемуся в шихте диоксиду кремния в соотношении $Al : SiO_2 = 1 : 1.85$. Это согласуется с результатами, приведенными в работе [12], но изменчивость состава БШ не позволяет заранее однозначно определить конечный состав продуктов синтеза и его отклонение от стехиометрии (1), а поэтому необходимы экспериментальные исследования по выбору оптимального состава шихты для каждого «регионального» БШ с последующим анализом свойств получаемых продуктов и температурной диагностикой устойчивости процесса СВС [13–18].

В целом, можно сформулировать следующие основные выводы работы:

1. Экспериментально показана возможность переработки БШ в формованные и неформованные огнеупоры с высокими эксплуатационными показателями жаростойкости и жаропрочности [19–20].
2. Анализ микроструктуры полученных муллитов выявил зависимость их фазового состава при изменении режима термохимической обработки T_0 от 900 °С до 1600 °С. Наиболее оптимальным термическим режимом следует считать 1300 °С для соотношения $Al_2O_3 : SiO_2$, равного 6:4.
3. В результате электронно-микроскопических исследований системы $Al_2O_3 - SiO_2$ установлено наличие трех характерных микроструктур, формирующихся по мере возрастания температуры спекания, вблизи 900 °С, 1300 °С и 1600 °С соответственно. Наименьшее влияние деформационных процессов характерно для микроструктур, спеченных при 1300 °С [19, 21].

Литература

1. Булатов, А. И. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности / А. И. Булатов, П. П. Макаренко, В. Ю. Шеметов. – Москва : Издательство «Недра», 1997. – 483 с. – EDN XSDQJZ. – Текст : непосредственный.
2. Оценка свойств отходов бурения скважин для выбора технологии их утилизации / Е. В. Голубев, О. Ю. Митрошин, Т. А. Бастракова, Н. С. Третьякова. – Текст : непосредственный. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – 2011. – № 1(51). – С. 133-139. – EDN NDFAYT.
3. Солодовников, А. Ю. Опыт утилизации отходов бурения в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре / А. Ю. Солодовников, А. В. Соромотин. – Текст : непосредственный // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 12. – С. 44-48. – EDN UYHJYP.
4. Mullite-Corundum Materials Based on Mullite Binder Resistant to High-Temperature Deformation / P. M. Pletnev, V. M. Pogrebenkov, V. I. Vereshchagin, D. S. Tyul'kin // Refractories and Industrial Ceramics. – 2018. – Vol. 58. – No 6. – P. 618-625. – DOI 10.1007/s11148-018-0156-x. – EDN XXYMDB.
5. Васильев, Е. А. О повышении эффективности геодезических исследований динамики оползневых склонов / Е. А. Васильев, Ю. П. Гуляев, О. Г. Павловская. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2010. – № 9. – С. 6-9. – EDN SNGDMR.
6. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов: Редакция 2.1. — Mi Swaco, 2009. – 100 с.
7. Плетнев, П. М. Физико-химические принципы получения огнеупоров для производства технической керамики / П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1(36). – С. 21-26. – EDN VSCXAZ.
8. The Structure and Characteristics of Wear-Resistant Coatings, Obtained by Supersonic Plasma Spraying / V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev [et al.] // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 1087-1095. – DOI 10.4028/p-nlfkoz. – EDN MZZIVV.
9. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, И. В. Милукова [и др.]. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2007. – № 3. – С. 39-41. – EDN PBBHWH.
10. Солоненко, О. П. Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер / О. П. Солоненко, И. П. Гуляев, А. В. Смирнов. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – Т. 34. – № 24. – С. 22-27. – EDN RCVBKD.
11. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй / А. Е. Свистула, Д. Д. Матиевский, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – Текст: непосредственный // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29-31.
12. Revised Phase Diagram for the System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ / S. Aramaki, R. Roy // J. Am. Ceram. Soc. – 1962. – Vol. 45 (5). – P. 229-242. – DOI 10.1111/j.1151-2916.1962.tb11133.x
13. Долматов, А. В. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, Р. Р. Имамов. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2(33). – С. 32-42. – EDN SYJYXV.
14. Dolmatov, A. V. Thermal imaging complex with tracking function for joint research of microheterogeneous processes and macrokinetics of SHS phenomenon / A. V. Dolmatov, P. Y. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series : The International Conference "Information Technologies in Business and Industry", Novosibirsk, 18–20 февраля 2019 года. – IOP Publishing: IOP Publishing, 2019. – P. 062006. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062006. – EDN YKZLNK.

15. Criteria for spin instability based on the node distribution in Trace-transform of the SHS combustion wave chronogram / A. Grigoryevskaya, V. Jordan, I. Shmakov, P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series : 6, Samara, 26–29 мая 2020 года. – Samara, 2021. – P. 012065. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012065. – EDN HAEBNE.
16. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 14–16 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010. – EDN AVCCTJ.
17. Гуляев, П. Ю. Байесовское восстановление цвета цифровых изображений / П. Ю. Гуляев, Ю. П. Гуляев, А. В. Долматов. – Текст: непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 1997. – № 2. – С. 114-115.
18. Boronenko, M. High-speed visualization of combustion synthesis discrete reaction waves: Coherent heat microstructures / M. Boronenko, P. Gulyaev, A. Dolmatov // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 16–22 сентября 2018 года. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042021. – DOI 10.1088/1742-6596/1115/4/042021. – EDN EAWOAN.
19. Kapustin, R. D. Refractory and heat-insulating materials based on aluminosilicate SHS compositions / R. D. Kapustin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chernogolovka, 23–26 октября 2018 года. – Chernogolovka: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012016. – DOI 10.1088/1757-899X/558/1/012016. – EDN FSGPHY.
20. Kapustin, R. D. Effect of Additives on Physicomechanical Properties of High-Strength AS-Materials / R. D. Kapustin, E. S. Moizis // Refractories and Industrial Ceramics. – 2019. – Vol. 60. – No 1. – P. 43-45. – DOI 10.1007/s11148-019-00306-0. – EDN KIPLZN.
21. Гуляев, Ю. П. Анализ подходов к обоснованию точности наблюдений за деформационными процессами / Ю. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2007. – № 8. – С. 11-16. – EDN KWEJFJ.