

Д. т. н. **Е. В. Ткач**¹ (✉), д. т. н. **К. А. Нурбатуров**² (✉)

¹ ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

² ТОО «ИННОБИЛД», Алматы, Республика Казахстан

УДК 666.762.1:628.4.038

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ-УНОСА

Исследована возможность использования золы-уноса ТЭС для получения плавленного муллитового порошка с дальнейшим его применением в качестве наполнителя алюмосиликатных огнеупоров. Введение в состав сырьевой шихты в качестве связующего ортофосфорной кислоты позволило снизить температуру обжига шамотных огнеупоров на 150–200 °С, что является важным фактором в современной организации производства по энергосберегающей технологии. Полученные изделия согласно требованиям ГОСТ 390–2018 соответствуют шамотным изделиям марки ШВ и рекомендуются к использованию для футеровки тепловых агрегатов.

Ключевые слова: алюмосиликатные огнеупоры, псевдобинарная система анортит – муллит, кристаллизационная способность, энергосберегающая технология.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Одной из важнейших проблем, возникающих перед современными производствами, является обеспечение промышленности огнеупорными материалами как на основе традиционных сырьевых материалов, так и с привлечением ранее не используемого сырья [1–5]. Одним из путей повышения эффективности использования материальных ресурсов является широкое использование отходов энергетических предприятий. В обзоре литературы представлены результаты широких исследований диаграммы состояния $Al_2O_3-SiO_2$, однако до сих пор нет однозначной интерпретации поведения муллита вблизи температуры плавления и его химического состава. Отсутствуют систематические данные о процессе муллитообразования в поликомпонентном сырье, в частности в отходах алюмосиликатного состава. Исследовано поведение лишь отдельно каждого оксида, усиливающего или тормозящего муллитообразование в системе. Знание комплексного влияния примесей на процессы минералообразования позволит при соответствующей корректировке химического состава золы, а также при применении разных

технологических приемов управлять кристаллизацией муллита при синтезе огнеупорных материалов. Анализ литературных данных по синтезу алюмосиликатных огнеупоров показывает многообразие технологий и исходных сырьевых компонентов (каолиновые глины, каолины, бокситы, силлиманиты и др.). Следовательно, при синтезе огнеупорных материалов с заданными свойствами необходимо знание процессов, протекающих при их производстве и определяющих правильный выбор технологии обработки сырья [5–10].

Установлено, что при использовании способа литья огнеупорные изделия имеют высокие плотность и кристаллизационную способность, а также низкую пористость. Однако отливки при этом получают с зональной структурой, что отрицательно сказывается на их эксплуатационных характеристиках. В этой связи наиболее эффективной является переработка плавного муллита в порошок, который используется в качестве одного из компонентов шихты при получении муллитокорундовых огнеупоров полусухим прессованием. При этом муллит придает огнеупорам высокую термостойкость, так как обладает низким ТКЛР.

В зависимости от требований, предъявляемых к огнеупорным изделиям, особый интерес представляют вяжущие фосфатного твердения, поскольку структура фосфатов сходна со структурой силикатов [10–15]. Состав и количество фосфатного связующего существенно влияют на стойкость огнеупоров при высоких температурах, чему благоприятствуют повышенная



Е. В. Ткач
E-mail: ev_tkach@mail.ru

К. А. Нурбатуров
E-mail: kanashnurbatyrov@mail.ru

огнеупорность образующихся фосфатов алюминия и железа, а также возможность расширения сырьевой базы.

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основных сырьевых материалов применяли золу-унос Ермаковской электростанции, получаемую при сжигании углей Экибастузского месторождения (Республика Казахстан), технический глинозем, аркалыкские бокситы и глину Верхне-Ашутского месторождения, каолин (вскрыша Илийского месторождения бурых углей), нормальный электрокорунд марки 15А и технический глинозем. При изучении кристаллизационной способности и свойств псевдобинарной системы анортит – муллит, а также влияния оксида железа на процессы муллитобразования в этой системе применяли реактивы Al_2O_3 , SiO_2 , CaO и Fe_2O_3 ; связующими служили сульфитно-спиртовая барда и ортофосфорная кислота. Химический состав сырьевых материалов приведен в табл. 1.

По минеральному составу зола представлена в основном стеклофазой (60–65 %), аморфизированными глинистыми агрегатами (30 %) и кристаллической фазой (10 %), состоящей из кварца, полевых шпатов, муллита, оксидов железа и корунда. Основными компонентами золы являются оксиды кремния и алюминия, что благоприятно сказывается на подборе составов при синтезе алюмосиликатных огнеупоров. Все компоненты шихты предварительно высушивали.

Плавленный муллит и образцы системы анортит – муллит получали в высокочастотной печи ВЧГ-60KW в интервале 1800–1950 °С в корундовых тиглях. После 2-ч выдержки при максимальной температуре расплав заливали в стальную форму и отжигали при 950–1100 °С. Для получения муллитового порошка электроплавленный материал дробили, а затем мололи в шаровой мельнице и пропускали через сито с размерами ячеек 1 и 0,05 мм. Для изготовления образцов муллитокорундовых огнеупоров дозированные по массе компоненты шихты перемешивали в фарфоровом барабане, смачивали шликером из ортофосфорной кислоты и каолинитовой глины или раствором сульфидно-спиртовой барды. Полученную смесь прессовали под давлением

80–100 МПа, сушили 24 ч при 20–25 °С, обжигали в высокочастотной печи при 1550–1600 °С в течение 8 ч и охлаждали в печи по мере ее остывания. Обжиг глины на шамот проводили в лабораторной печи с карбидкремниевыми нагревателями при 1350–1400 °С в течение 8 ч, после чего продукт рассевали на фракции через сито с размерами ячеек 3, 2 и 0,5 мм. Для получения образцов шамотных огнеупоров шихту смачивали глино-фосфатным шликером и прессовали в стальной пресс-форме под давлением 30–40 МПа с последующим обжигом в печи с силитовыми нагревателями при 1150 °С.

Физико-химические и механические свойства образцов определяли по стандартным методикам, фазовый состав — на дифрактометре ДРОН-ИМ1. Для структурных исследований применяли электронный растровый микроскоп-микроанализатор FEI Quanta 200 SEM. Для определения состояния железа при изоморфных замещениях в исходной и термообработанной золе использовали метод ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбауэра); измерения проводили на ядерно-гамма-резонансном спектрометре LP-4000. Электронно-зондовый микроанализ элементов выполняли на приборе Superprob JCMA-733, качественный анализ — с помощью энергодисперсионного спектрометра Link-860.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведено комплексное исследование процессов, происходящих в золе в интервале 1100–1900 °С, которое обусловлено температурными пределами технологии получения высокоглиноземистых материалов. В процессе термообработки золы до 1500 °С матрица стекла имеет смешанную основу, в том числе анортитовую и кремнеземистую ($N_{cp} = 1,525$, $N_{cp} = 1,572$). Непосредственно в стекле видна кристаллизация анизотропных частиц муллита и изотропных прозрачных кристаллов α -кristобалита ($N_{cp} = 1,473$). При 1700 °С в общей аморфной неполяризуемой массе выделяются участки, состоящие из рекристаллизованного муллита. Переход золы в расплавленное состояние происходит при 1750 °С. Образец состоит из прозрачного стекла с $N_{cp} = 1,51161$. Муллит наблюдается в виде радиально-лучистых и перистых скоплений

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов, мас. %

Сырьевые материалы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O ₄	TiO ₂	P ₂ O ₅	$\Delta m_{прк}$
Зола-унос	58,28	26,5	2,1	0,56	7,12	1,05	0,05	2,21	0,61	0,49
Каолин	45,16	31,38	1,51	0,58	7,12	0,37	0,05	–	–	13,83
Глина	59,20	28,30	0,71	1,30	0,90	0,87	2,40	–	–	7,00
Электрокорунд	0,25	99,10	–	–	–	–	0,65	–	–	–
Технический глинозем	0,41	97,9	0,35	–	0,5	–	–	–	–	1,29
Боксит	8,04	48,09	1,42	0,58	18,08	–	0,26	–	–	23,08

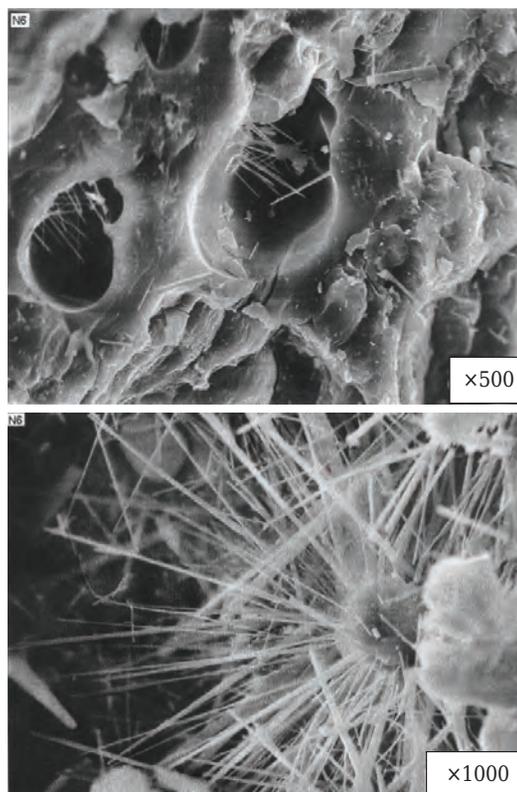
игл ($N_g = 1,630$, $N_p = 1,630$). Присутствуют зерна α -кristобалита, количество которого значительно уменьшается с повышением температуры. При 1850–1900 °C муллит кристаллизуется в виде игольчатых агрегатов (см. рисунок). Следовательно, температура термообработки влияет на характер формирования кристаллов муллита. Игольчатые формы возникают только при высоких температурах и в присутствии жидкой фазы.

Мессбауэровский спектр исходной золы представляет собой суперпозицию нескольких простых спектров, в одном из которых имеется магнитное расщепление (Fe в составе оксидов), в другом — квадрупольное расщепление (Fe в составе силикатов). По результатам обработки спектров, 60 % атомов железа в исходной золе представлены оксидами, 40 % входят в состав стеклофазы. С ростом температуры отмечены повышенное содержание гематита и снижение количества магнетита до его полного исчезновения при 800 °C. В интервале 1300–1500 °C экспериментальный спектр показал исчезновение линий гематита, при этом ионы Fe^{2+} присутствуют в двух координациях (главным образом в тетраэдрической), а ионы Fe^{3+} только в тетраэдрической (табл. 2).

Спектр образца золы, термообработанного при 1500 °C в восстановительных условиях, содержит линии, соответствующие смеси α - Fe_2O_3 , карбиду и силициду железа. После полного расплавления золы в интервале 1750–1900 °C содержание соединений железа в расплаве уменьшается в результате коагуляции железистых образований в корольки и оседания их в нижнюю зону расплава. Мессбауэровские спектры образца золы, термообработанного при 1800–1900 °C, позволяют выделить дублет с параметрами, отвечающими по чистоте силициду и карбиду железа. Остальная часть железа входит в состав стеклофазы. Существенное уменьшение площади спектров этой серии образцов при повышении температуры указывает на снижение количества резонансных ядер железа. Содержание железа в верхней зоне расплава снижается от 5,1 до 1,17 %.

Таким образом, результаты исследований показали перспективность использования золы в качестве исходного сырья для получения материалов с муллитовой основой. Однако их синтез невозможен без использования глиноземсодержащих компонентов, которые обеспечат образование более мономинерального состава. С учетом вероятности использования многокальциевого и многожелезистого сырья возникает необходимость исследования псевдобинарных систем анортит – муллит и анортит – муллит – Fe_2O_3 .

Далее в работе исследовали фазовые превращения стеклокристаллических материалов в



Кристаллизация муллита в виде игольчатых агрегатов при 1850–1900 °C

Таблица 2. Численные значения мессбауэровских спектров и координационное распределение ионов железа при разной температуре обработки

Ион железа	σ , мм/с	E , мм/с	Координационное число	Площадь спектра, мм ²
При 1300 °C				
Fe^{2+}	0,579	1,028	4	80,7
Fe_2^{3+}	1,504	2,189	6	7,13
Fe_2^{3+}	1,158	1,965	4	12,80
При 1400 °C				
Fe^{2+}	0,583	1,022	4	61,55
Fe_2^{3+}	1,158	1,065	4	22,73
Fe_2^{3+}	1,504	2,189	6	15,72
При 1500 °C				
Fe^{2+}	0,583	1,022	4	33,78
Fe_2^{3+}	1,504	1,189	6	25,16
Fe_2^{3+}	1,158	1,965	4	41,06

псевдобинарной системе анортит – муллит. Свойства стеклокристаллических материалов определяются фазовым составом, их количеством, соотношением и характером кристаллизации. При исследовании зависимости технологических, физико-химических свойств и кристаллизационной способности образцов псевдобинарной системы анортит – муллит от фазового состава, а также определения областей сосуществования этих фаз для получения материалов с заданными свойствами за основу взяты стехиометрические отношения оксидов, характерные для анортита $CaAl_2Si_2O_8$, муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, составы кото-

рых с их разными соотношениями приведены в табл. 3. Выбор составов и температуры их плавления осуществляли по диаграмме состояния системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Соблюдение единых условий получения образцов системы достигалось повышением температуры их плавления на 100°C выше ликвидусной.

Следует отметить, что в образцах начиная с состава 4 (см. табл. 3) наблюдается самопроизвольная кристаллизация муллита уже при выработке расплава. Образцы составов 1–3 представлены анортитовым стеклом с $N_{\text{ср}} = 1,571$. В образце состава 3 наблюдается слабая кристаллизация муллита, что связано, видимо, с разрушающим действием оксида кальция в количестве 12 % и более на кристаллическую решетку. По результатам рентгенографических и петрографических исследований установлено, что после дополнительной термообработки в течение 1 ч при 1100°C образцы составов 1–3 состояли из триклинного анортита с $N_g = 1,590$, $N_m = 1,580$, который кристаллизуется в форме короткостолбчатых кристаллов и зерен неправильной формы. Были исследованы также составы псевдобинарной системы анортит – муллит с добавкой 3 % оксида железа.

Установлено, что в системе анортит – муллит – Fe_2O_3 слабая кристаллизация муллита происходит уже в образце состава 2. Следовательно, оксид железа в количестве до 3 % катализирует муллитообразование в системе, хотя оксиды кальция одновременно подавляют его. Структурные исследования, проведенные методом микрозондов, подтверждают результаты кристаллооптического анализа. В режиме рентгеновского излучения прослеживается распределение железа в объеме полученных образцов. Основная его часть находится в промежуточном стекле, остальная — в решетке кристаллического муллита. По мере приближения к составу, соответствующему стехиометрии муллита, меняется характер минералообразования. Беспорядочно расположенные кристаллы этой фазы приобретают одинаковую направленность и укрупняются в объеме образца. Игольчатый муллит превращается в длиннопризматический и переходит в

агрегатные скопления, расположенные почти параллельно друг другу, что ухудшит физико-механические свойства изделий на его основе. Выявлен оптимальный состав шихты, содержащей около 70 % муллита и 30 % анортита. Плотность, количество нерастворимого остатка, химическая стойкость к H_2SO_4 увеличиваются от анортита к муллиту, что вполне закономерно. Результаты проведенных исследований имеют теоретическое и практическое значение при изготовлении материалов на основе чистых оксидов, а также с использованием отходов промышленных производств, и позволяют прогнозировать свойства получаемых изделий.

Следующий этап исследований — разработка технологии получения алюмосиликатных изделий трех видов: блоков из плавленого муллита с последующей переработкой их в порошок, муллитокорундовых и шамотных огнеупоров. Для синтеза муллитокорундовых огнеупоров изучали две серии образцов. В первой серии в качестве наполнителя использовали порошок корунда и муллита, полученный плавлением золы и технического глинозема (зола 60 %, Al_2O_3 40 %), во второй серии основными компонентами шихты являлись зола, электрокорунд и технический глинозем. Выявлено, что при содержании в шихте менее 25 % тонкомолотого муллита снижается плотность огнеупоров, а при его содержании более 40 % увеличивается усадка. Свободный кремнезем, содержащийся в порошке плавленого муллита и в золе, взаимодействует в процессе обжига с техническим глиноземом с образованием вторичного муллита, в результате чего внутреннее пространство между зёрнами корунда заполняется плотносспекшимися кристаллами. Это приводит к дополнительному уплотнению изделий. Свободный кремнезем взаимодействует также с граничными участками зерен корунда, что положительно влияет на конечные свойства огнеупоров: повышаются их прочность и термостойкость, так как муллит обладает более низким ТКЛР, чем электрокорунд. Оптимальными являются два состава шихты: состав 1 — муллит фракции 0,5–1,0 мм 30 %,

Таблица 3. Составы шихт в системе анортит–муллит

Номер состава	Состав шихты, мас. %		Содержание в шихте, мас. %			$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кпл}}, ^\circ\text{C}$
			CaO	Al_2O_3	SiO_2		
1	Анортит	100	20,15	36,65	43,20	1550	1650
2	Анортит/муллит	90/10	18,13	40,17	41,70	1580	1680
3	Анортит/муллит	80/20	16,12	43,68	40,20	1620	1720
4	Анортит/муллит	70/30	14,1	47,20	38,70	1650	1750
5	Анортит/муллит	60/40	12,09	50,71	37,20	1690	1790
6	Анортит/муллит	50/50	10,7	54,23	35,70	1730	1850
7	Анортит/муллит	40/60	8,05	57,74	34,20	1750	1850
8	Анортит/муллит	30/70	6,05	61,25	32,70	1760	1860
9	Анортит/муллит	20/80	4,03	64,77	31,20	1830	1900
10	Анортит/муллит	10/90	2,01	68,29	29,70	1850	1900
11	Муллит	100	–	71,80	28,20	1850	1900

мельче 0,5 мм 30 %, глинозем 15 %, электрокорунд (2–1 мм) 25 %, состав 2 — зола 40 %, электрокорунд 40 %, глинозем 20 %. Муллитокорундовые огнеупоры обоих составов имеют следующие характеристики: открытая пористость 17 % термостойкость 25 водяных теплосмен от 1300 °С, предел прочности при сжатии 120 МПа, огнеупорность 1850 °С (состав 1) и 1800 °С (состав 2).

При изготовлении шамотных огнеупоров в шихту вводили каолиновую глину (пластификатор) и шамот (наполнитель). Наилучшие результаты показал следующий фракционный состав зерен шамота, %: фракции 3–2 мм 30–40, 2–1 мм 40–50, мельче 1 мм 10–20. Кусковой шамот спекали до водопоглощения 4,0 %, так как массы с плохо спеченным шамотом проявляют большую склонность к расслаиванию в связи с повышенным упругим расширением пористого шамота. Высококачественный шамот увеличивает огнеупорность образцов. Оптимальным является следующий состав шихты шамотных огнеупоров: зола 35 %, шамот 50 %, глина 15 %. В разрезе полученные огнеупоры имеют равномерные цвет и структуру; остатков несгоревшего топлива, вводимого с золой, не обнаруживается. Температура обжига 1150 °С является нетрадиционной. Ее снижение на 150–200 °С (по сравнению с температурой обжига огнеупоров на основе глино-шамотной шихты) происходит за счет введения в качестве связующего ортофосфорной кислоты, а также присутствующих в золе кокса и полукокса как дополнительных топливных компонентов. Это является важным фактором в современной организации производства по энергосберегающей технологии.

Установлено, что сырец с добавкой H_3PO_4 при нагревании немного вспучивается и покрывается трещинами. Применение глинофосфатных связок (шликера) позволит исключить вспучивание, так как при взаимодействии глины с кислотой происходит ее дегидратация, в результате чего гидроксильные ионы OH^- глины замещаются ионами PO_4^{3-} . Образцы состоят преимущественно из муллита, фосфокристаллита и кварца и обладают следующими свойствами: термостойкость 10 водяных теплосмен от 1300 °С, плотность 2150 кг/м³, водопоглощение 8,0 %, дополнительная усадка при 1250 °С 0,3 %. Образцы шамотных огнеупоров согласно требованиям ГОСТ 390–2018 «Изделия огнеупорные шамотные и полукислые общего назначения. Технические условия» соответствуют марке ШВ и рекомендуются к использованию для футеровки тепловых агрегатов. Таким образом, в результате проведенных исследований выявлена принципиальная возможность получения муллитокорундовых огнеупоров, а также получен шамотный огнеупор с использованием отходов энергетических предприятий по энергосберегающей технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны химико-технологические основы получения муллитокорундовых огнеупоров с использованием золы Экибастузского месторождения по ресурсоэнергосберегающей технологии.

2. Комплексно исследованы процессы минералообразования, происходящие в золе в интервале 1100–1900 °С. Установлено присутствие муллита, α -кристобалита и рентгеноаморфной фазы, причем количество муллита с повышением температуры возрастает и достигает максимума при 1850 °С, а количество α -кристобалита и стеклофазы резко уменьшается.

3. Исследованы фазовые превращения соединений железа в золе, термообработанной в интервале 20–1900 °С, методом спектроскопии. Выявлено, что в интервале 20–1200 °С железо присутствует в форме оксидов, а также входит в состав стекла в ионной форме, а в интервале 1200–1500 °С практически вся железосоставляющая золы находится в стеклофазе, в которой соотношение Fe^{2+} и Fe^{3+} меняется. Выше 1500 °С образуются оксиды, силициды и карбиды железа, которые возникают в виде капель корольков и оседают на дно варочной зоны печи, очищая тем самым расплав от примесей железа, содержание которого в верхней зоне расплава снижается от 5,1 до 1,17 %.

4. Исследованы фазовые превращения, кристаллизационная способность и характер минералообразования в псевдобинарных системах анортит – муллит или анортит – муллит – Fe_2O_3 . Установлено, что оксид железа в количестве до 3 % катализирует процессы муллитобразования, в то время как оксид кальция (при его содержании в системе от 12 % и более) полностью или частично подавляет кристаллизацию муллита. Максимальная кристаллизация муллита в стехиометрическом составе 94–95 %. Определены физико-механические и химические свойства образцов системы для определения области оптимального соотношения фаз, позволяющего получить материалы с заданными свойствами. Выявлено, что лучшие физико-механические свойства имеют составы шихты с содержанием муллита 70 % и анортита 30 %.

Библиографический список

1. **Sokov, V. N.** Clinkerless complex binder out of refractory wastes and products on its base / V. N. Sokov, V. V. Sokov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — № 6. — P. 28–30. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-6-28-30>.
2. **Соков, В. Н.** Бесклинкерное комплексное вяжущее из отходов огнеупоров и изделия на его основе / В. Н. Соков, В. В. Соков // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 6. — С. 28–30. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-6-28-30>.
3. **Sokov, V. N.** Non-fire clay heat insulation from self-sealing masses based on burnable additives of plant

origin. Part 1. The choice of burnable additives of plant origin for self-consolidation of masses in a hydraulically closed volume / V. N. Sokov // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — № 7. — P. 51–54. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-51-54>.

Соков, В. Н. Бесшамотная теплоизоляция из самоуплотняющихся масс на основе выгорающей добавки растительного происхождения. Часть 1. Выбор выгорающей добавки растительного происхождения для самоуплотнения масс в гидравлически закрытом объеме / В. Н. Соков // Новые огнеупоры. — 2019. — № 7. — С. 51–54. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-51-54>.

3. **Кащеев, И. Д.** Химическая технология огнеупоров / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М. : Интернет Инжиниринг, 2007. — 752 с.

4. **Бирюкова, А. А.** Пористая керамика алюмосиликатного состава на основе корунда / А. А. Бирюкова, Т. А. Тихонова, А. В. Паничкин [и др.] // Комплексное использование минерального сырья. — 2013. — № 4. — С. 87–99.

5. **Vakalova, T. V.** A new raw material for aluminosilicate ceramics for refractory and engineering use / T. V. Vakalova, V. M. Pogrebenkov, O. A. Chernousova // Refract. Ind. Ceram. — 2002. — № 7. — С. 54–58. <https://doi.org/10.1023/A:1021031818417>.

Вакалова, Т. В. Новый сырьевой материал для алюмосиликатной керамики огнеупорного и технического назначения / Т. В. Вакалова, В. М. Погребенков, О. А. Черноусова // Огнеупоры и техническая керамика. — 2002. — № 7. — С. 54–58. <https://doi.org/10.1023/A:1021031818417>.

6. **Хоменко, Е. С.** Современная технология получения шамота высоких марок на основе качественного каолинового сырья / Е. С. Хоменко, О. А. Миршавка, В. В. Коледа, Р. Ю. Чернышева // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 9. — С. 20–24.

7. **Wang, B.** Influence of impregnation by magnesium sulfate solution on properties of magnesia-chrome bricks / B. Wang, R. Yu, S. Shi // Naihao Cailiao / Refractories. — 2008. — Vol. 42, № 4. — P. 279–281.

8. **Плетнев, П. М.** Экспериментальные составы корундомуллитовых огнеупоров на основе отечественного сырья / П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 3. — С. 10–14.

9. **Yong-Yue, D.** Influence of chrome-bearing sols vacuum impregnation on the properties of magnesia-chrome refractory / D. Yong-Yue, W. Hou-Zhi, Z. Hui-Zhong // Ceram. Int. — 2008. — Vol. 34, № 3. — P. 573–580.

10. **Викулин, В. В.** Корундомуллитовый материал для огнеприпаса и плавильных тиглей / В. В. Викулин, М. Ю. Русин, Т. М. Храновская // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 6. — С. 40–43.

11. **Kuzin, V. V.** Roughness of high hardness ceramic correlation of diamond grinding regimes with Al₂O₃-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 388–393. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9990-x>.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазно-го шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 7. — С. 65–70. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9990-x>.

12. **Хлыстов, А. И.** Повышение стойкости и долговечности алюмосиликатных огнеупоров в углеродсодержащей среде / А. И. Хлыстов, С. В. Соколова, Д. В. Марков // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 11. — С. 47.

13. **Lijie, Li.** Computer simulation of surface cracks behavior in anhydrous chemical conversion coatings on magnesium alloy / Li Lijie, Fang Yongchao, Cai Zhaobing [et al.] // Rare Metal Materials and Engineering. — 2018. — Vol. 47, № 2. — P. 431–435. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(18\)30083-3](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(18)30083-3).

14. **Мигаль, В. П.** Муллитовые изделия для лещади доменных печей / В. П. Мигаль, А. П. Маргишвили, В. В. Скурихин [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 3. — С. 39–46.

15. **Azarov, S. M.** Multilayer porous aluminosilicate ceramic / S. M. Azarov, T. A. Azarova, A. I. Ratko [et al.] // Glass and Ceramics. — 2009. — № 3. — С. 23–25. <https://doi.org/10.1007/s10717-008-9022-5>.

Азаров, С. М. Многослойная пористая алюмосиликатная керамика / С. М. Азаров, Т. А. Азарова, А. И. Ратько [и др.] // Стекло и керамика. — 2009. — № 3. — С. 23–25. <https://doi.org/10.1007/s10717-008-9022-5>. ■

Получено 01.07.20

© Е. В. Ткач, К. А. Нурбатуров, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramitec 2021
Technologies · Innovations · Materials

Hot spot for the ceramics industry

■ 16–19 ноября 2021 г.
■ г. Мюнхен, Германия

www.ceramitec.com