

К. т. н. **Е. С. Абдрахимова**¹ (✉), д. т. н. **В. З. Абдрахимов**²

¹ ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева), г. Самара, Россия

² ФГАОУ ВО «Самарский государственный экономический университет», г. Самара, Россия

УДК 666.774:628.4.038

ВЛИЯНИЕ НАНОТЕХНОГЕННОГО ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТОГО СЫРЬЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КИСЛОТОУПОРОВ

Использование нанотехногенного высокоглиноземистого ($Al_2O_3 > 70\%$) сырья нефтехимического производства — отработанного катализатора ИМ-2201 в составе кислотоупорных материалов на основе небогатой каолиновой глины позволяет получить изделия с высокими физико-механическими и химическими показателями в интервале температур обжига 1250–1300 °С. Нанотехногенное сырье способствует увеличению поверхностной энергии, которая является источником процесса спекания. В составах на основе небогатой каолиновой глины и шамота из нее образуется в основном муллит, который главным образом формирует эксплуатационные свойства керамических изделий. Данные рентгеновского анализа показали, что введение в керамические массы нанотехногенного высокоглиноземистого сырья способствует образованию корунда. Результаты ИК-спектроскопического анализа подтвердили данные рентгеновских исследований. Корунд отличается повышенной химической стойкостью к воздействию кислотных и щелочных реагентов и обеспечивает высокие физико-механические показатели кислотоупорных материалов.

Ключевые слова: кислотоупорные материалы, нанотехногенное сырье, отработанный катализатор ИМ-2201, небогатая каолиновая глина.

ВВЕДЕНИЕ

Спекание всех видов керамики (за исключением технической) происходит с участием жидкой фазы, от свойств которой во многом зависит процесс формирования структуры керамического материала [1–3]. Именно повышение реакционной способности жидкой фазы по отношению к тугоплавким кристаллическим составляющим позволяет интенсифицировать процесс спекания и уменьшить расход топлива. Поэтому в технологии керамических материалов фазовым превращениям [1, 2] придается особое значение, поскольку именно они главным образом определяют эксплуатационные свойства изделий.

Большая потребность разных отраслей промышленности в кислотоупорных материалах вынуждает ориентироваться на выпуск массовых изделий из доступного и дешевого сырья

[4]. Поскольку в России месторождения хорошо спекающихся огнеупорных и тугоплавких глин, пригодных для производства специальных кислотоупоров, отсутствуют [5], отечественные предприятия вынуждены закупать высокотемпературную и кислотостойкую керамику за границей.

В настоящее время для получения кислотоупоров необходимо применять глинистые материалы с повышенным содержанием Al_2O_3 (>18 %) и низким количеством Fe_2O_3 (<3,5 %) и CaO (<2 %) [4, 6]. В качестве отошителя используют шамот, который получают при обжиге глины в интервале 1200–1250 °С (до водопоглощения <5 %) [4, 6–8]. Понятно, что из низкосортных тугоплавких глин и шамота из этих глин получить качественные кислотоупоры практически невозможно. Поэтому разработка составов керамических масс для производства кислотоупоров из недефицитного сырья, в том числе с использованием отходов производства, является актуальной задачей.

Введение в состав керамических масс в качестве отошителя высокоглиноземистых (алюмосодержащих) отходов нефтехимического производства позволит значительно улучшить такие показатели кислотоупорных материалов,



Е. С. Абдрахимова
E-mail: 3375892@mail.ru

как прочность, кислотостойкость, термостойкость и морозостойкость за счет повышенного содержания в них оксида алюминия, особенно при содержании Al_2O_3 более 70 % [4, 6–8]. Механическая прочность высокоглиноземистой керамики возрастает при увеличении содержания Al_2O_3 и кристаллических фаз. С повышением температуры прочностные характеристики высокоглиноземистой керамики ухудшаются, особенно в присутствии стеклофазы [4, 9, 10].

Цель настоящей работы — получение качественных кислотоупоров на основе необогащенной каолиновой глины и нанотехногенного высокоглиноземистого ($Al_2O_3 > 70\%$) сырья нефтехимического производства — отработанного катализатора ИМ-2201, а также исследование влияния нанотехногенного сырья на физико-механические показатели и фазовый состав кислотоупоров.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования образцов кислотоупорных материалов в настоящей работе использовали современные методы химического анализа. Поэлементный анализ образцов проводили на растровом электронном микроскопе 6390A (JEOL). Основные технические характеристики микроскопа: разрешение до 3 нм, изображение во вторичных электронах и в отраженных электронах, увеличение 5–300000-кратное, ускоряющее напряжение от 0,5 до 30 кВ, максимальный диаметр образца до 150 мм. Исследования проводили в соответствии с методикой СамГТУ

«Методика определения химического состава твердых тел. Методика выполнения измерений с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра в составе растрового электронного микроскопа».

Качественный минеральный (фазовый) состав образцов проводили с применением рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3 с $Cu K_\alpha$ -излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: напряжение 35 кВ, ток 20 мА, детектор 2 град/мин. Интерпретацию дифрактограмм проводили с использованием данных картотеки ICDD (база порошковых дифрактометрических данных PDF2) и дифрактограмм чистых от примесей минералов. ИК-спектры поглощения получали на спектрофотометре Spekord-75JR. Образцы были изготовлены в виде суспензии порошка с вазелиновым маслом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сырьевые материалы

Для получения кислотостойкого материала использовали необогащенную каолиновую глину Чапаевского месторождения, шамот из обожженной при 1200 °С каолиновой глины в качестве отощителя и отработанный катализатор ИМ-2201. Химический состав сырьевых материалов приведен в табл. 1 и 2, их микроструктура и минеральный состав показаны соответственно на рис. 1 и 2.

Каолиновая глина Чапаевского месторождения. По содержанию ($Al_2O_3 + TiO_2$) эта

Таблица 1. Усредненный оксидный химический состав сырьевых материалов, мас. %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	$\Delta m_{прк}$
Каолиновая глина	65,70	16,17	3,11	3,21	0,83	–	0,48	7,47
Отработанный катализатор ИМ-2201	7,90	74,50	0,15	–	0,10	14,80	1,58	–
Шамот	70,87	20,15	3,44	3,71	1,10	–	0,73	–

* R₂O = K₂O + Na₂O.

Таблица 2. Поэлементный химический состав сырьевых материалов, мас. %

Материал	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	Cr	K	Ca	Fe
Каолиновая глина	3,04	57,44	0,24	0,44	12,70	23,21	–	0,18	2,58	2,17
Отработанный катализатор ИМ-2201	–	58,74	1,0	–	28,58	2,82	8,1	1,80	–	0,01
Шамот	–	63,12	0,20	0,38	10,18	21,87	–	0,15	2,12	1,98

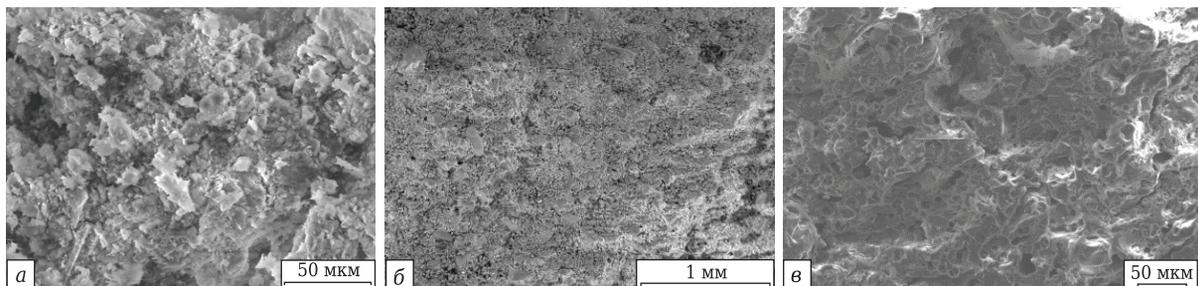


Рис. 1. Микроструктура сырьевых материалов: а — каолиновая глина Чапаевского месторождения, $\times 500$; б — отработанный катализатор ИМ-2201, $\times 250$; в — шамот, $\times 300$

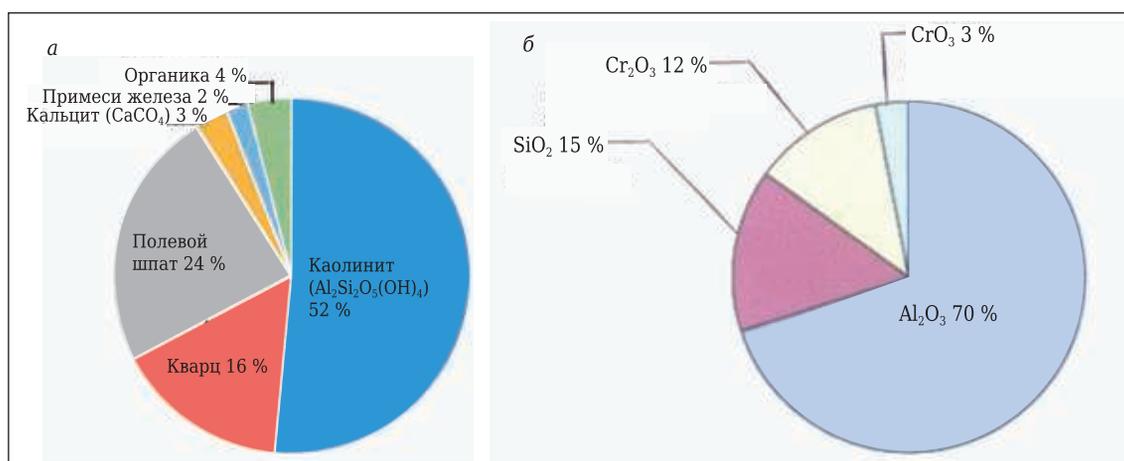


Рис. 2. Минеральный состав каолиновой глины (а) и отработанного катализатора ИМ-2201 (б)

глина относится к полукислым глинам с высоким содержанием красящих оксидов ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 3\%$), по содержанию частиц размерами менее 0,005 мм (35–38 %) — к грубодисперсным глинам, по пластичности — к умеренно-пластичным (число пластичности 12–14), по чувствительности к сушке — к малочувствительным, по огнеупорности — к тугоплавким (огнеупорность 1520–1550 °С), по спекаемости — к высокотемпературным (спекается >1300 °С с интервалом спекания 100–120 °С). Микроструктура необогащенной каолиновой глины показана на рис. 1, а, ее минеральный состав на рис. 2, а.

Шамот. Шамот, используемый в качестве отощителя, получен при обжиге каолиновой глины Чапаевского месторождения при 1200 °С. Как видно из табл. 1, при обжиге каолиновой глины при 2000 °С шамот обогатился Al_2O_3 совсем незначительно — соответственно от 16,17 до 20,15 % [8]. Отощающие материалы вводят в керамические массы для создания механического каркаса, регулирования пластичности массы, сокращения усадки в процессе сушки сформованных полуфабрикатов и формирования структуры материала при обжиге.

Отработанный катализатор ИМ-2201. Почти 90 % химических процессов требуют применения катализаторов. В процессах нефтепереработки, например, используется 35–40 % всех применяемых в России катализаторов. Несмотря на появление катализаторных производств, российский рынок сильно зависит от поставок зарубежных катализаторов, что ставит вопрос импортозамещения в ряд наиболее актуальных.

Отработанный катализатор ИМ-2201 является нанотехногенным высокоглиноземистом сырьем нефтехимического производства Новокуйбышевской нефтехимической компании и представляет собой дисперсионный скомкавшийся порошок (рис. 1, б) с удельной поверхностью до 8000 $\text{см}^2/\text{г}$ и числом пластичности 8–10; его огнеупорность может достигать 2000 °С

[11–14]. Как видно из табл. 1, содержание Al_2O_3 в нанотехногенном катализаторе составляет 74,5 %. В составе неметаллических материалов Al_2O_3 чаще всего встречается в виде высокотемпературной α -модификации, являющейся аналогом природного корунда с температурой плавления 2050 °С [15, 16]. Наноразмерность отработанного катализатора колеблется в пределах от 80 до 1000 нм в зависимости от условий образования [16].

Размерность частиц отработанного катализатора ИМ-2201 определяли в Научно-исследовательском институте ядерных исследований (г. Гатчина Ленинградской обл.) методом малоуглового рассеяния нейтронов на дифрактометре «Мембрана-2» [16]. В настоящее время в производстве керамических материалов точный размер частиц, которые можно отнести к наночастицам, не установлен. Авторы настоящей статьи придерживаются мнения многих ученых [16], которые к наночастицам относят частицы размерами до 1000 нм, кластеры (1 нм), молекулы (0,5 нм), коллоидные частицы (3–100 нм), вирусы (100 нм). Для сравнения: человеческий волос имеет толщину $10 \cdot 10^3$ – $15 \cdot 10^3$ нм, размеры клетки крови $5 \cdot 10^3$ – $10 \cdot 10^3$ нм, бактерии $1 \cdot 10^3$ нм, частицы дыма $1 \cdot 10^3$ нм, диаметр атома углерода 0,142 нм.

Получение кислотоупорных плиток

Установлено [17], что замена кислотоупорного изделия в виде кирпича кислотоупорной плиткой позволит снизить расход сырья в 2,5 раза, а массу футеровки почти в 3 раза. Кроме того, кислотоупорные плитки лучше подвергаются термообработке; при этом сокращаются сроки их сушки и обжига. Поэтому авторы настоящей статьи проводили исследования на кислотоупорных плитках. По ГОСТ 961–89 кислотоупорные и термокислотоупорные плитки подразделяются на пять марок в зависимости от их назначения: КШ — кислотоупорные шамотные, КФ — кислотоупорные фарфоровые, ТКШ — тер-

моксислотостойкие шамотные, ТКД — термостойкие дунитовые, КС — кислотостойкие плитки сухого прессования; авторы исследовали получение кислотостойких плиток марок КШ и ТКШ.

Обеспечение требуемых технических характеристик кислотостойким, испытываемым высокотемпературными и механическими нагрузками в процессе службы, можно достигнуть только путем соблюдения всех технологических параметров, которые позволят сформировать оптимальную структуру материала из каркаса зерен тугоплавкого наполнителя (определенного фракционного состава), скрепленного керамической связкой [4–6, 15, 18].

Керамическую массу (шихту) готовили из составов, приведенных в табл. 3, пластическим способом при влажности 22–24 %. Формовали квадратные плитки типа ПК-1 (100×100×20 мм), которые высушивали до остаточной влажности

Таблица 3. Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонента, мас. %, в массе		
	1	2	3
Необогащенная каолиновая глина	100	60	60
Шамот из обожженной каолиновой глины	–	40	–
Отработанный катализатор ИМ-2201	–	–	40

Таблица 4. Расчетные составы шихт 2 и 3, мас. %

Состав керамической массы (шихты)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	Δm _{прк}
2	68,87	17,85	3,55	3,51	0,94	–	0,60	4,68
3	44,38	40,10	1,93	1,92	0,54	5,92	0,73	4,48

Таблица 5. Физико-механические показатели кислотостойких плиток

Показатели	Плитка состава			Плитки кислотостойкие и термостойкие марки КШ (кислотостойкие шамотные) по ГОСТ 961–89
	1	2	3	
<i>Керамические массы</i>				
Пластичность шихты	13	8	10	–
Длительность сушки (кирпича), ч	68	48	45	–
Усадка (высушенного кирпича), %	5,8	5,2	4,7	–
<i>Плитки после обжига при 1250 °С</i>				
Водопоглощение, %	5,8	5,1	4,2	Менее 5,0
Кислотостойкость, %	97,5	97,8	98,7	Не менее 98,0
Предел прочности, МПа:				
при сжатии	57,2	60,1	72,2	Не менее 50
при статическом изгибе	26,4	32,3	42,8	Не менее 25
Морозостойкость, циклы	42	47	58	Не менее 20
Термостойкость, теплосмены	4	6	8	Не менее 5
<i>Плитки после обжига при 1300 °С</i>				
Водопоглощение, %	5,1	4,8	3,4	Менее 5,0
Кислотостойкость, %	98,1	98,4	99,1	Не менее 98,0
Предел прочности, МПа:				
при сжатии	63,8	69,2	72,5	Не менее 50
при статическом изгибе	32	38	55	Не менее 25
Морозостойкость, циклы	52	62	74	Не менее 20
Термостойкость, теплосмены	6	8	11	Не менее 5

5 % и обжигали при 1250 и 1300 °С. В табл. 4 приведены расчетные химические составы керамических масс, в табл. 5 — физико-механические показатели кислотостойких плиток.

По содержанию Al₂O₃ алюмосиликатные огнеупоры согласно требованиям ГОСТ 28874 делятся на следующие группы: полукислые с содержанием Al₂O₃ от 14 до 28 мас. %, шамотные — от 28 до 45 мас. %, высокоглиноземистые — от 45 до 95 мас. %. Как видно из табл. 1 и 4, составы 1 и 2 относятся к группе полукислых огнеупоров, состав 3 относится к группе шамотных огнеупоров. На рис. 3 показаны дифрактограммы образцов составов 1–3, обожженных при 1300 °С, на рис. 4 — их ИК-спектры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования показали, что из небогатой каолиновой глины Чапаевского месторождения, содержащей Al₂O₃ менее 18 %, невозможно получить кислотостойкие плитки, соответствующие по физико-механическим и химическим показателям требованиям стандарта даже при температуре обжига 1300 °С (табл. 5). Введение в состав керамической массы оптимального количества шамота (40 %, см. табл. 3) позволяет получить кислотостойкие плитки, соответствующие требованиям стандарта по физико-механическим показателям, при температуре обжига 1300 °С (см. табл. 5).

Под оптимальным содержанием отощителя в настоящей работе принимается такое количество, при котором число пластичности керамической массы (шихты) снижается от 13 до 8 (см. табл. 5), так как при меньшем числе пластичности шихты на изделиях при формовании появляются трещины.

Состав № 2 относится к полукислым огнеупорам и кислотоупорам. Полукислые огнеупоры и кислотоупоры можно использовать не только на небольших участках футеровки коксовых печей и некоторых других сталелитейных агрегатов, но и как противопожарную изоляцию — этот вид огнеупоров имеет большие перспективы [4, 18].

Введение в керамическую массу отработанного катализатора ИМ-2201 в количестве 40 % (как и шамота) снижает число пластичности от 13 до 10 (см. табл. 4), так как отработанный катализатор сам имеет число пластичности 8–10, что значительно улучшает формовочную способность шихты. Использование отработанного катализатора в производстве кислотоупорных материалов позволяет получить изделия с высокими физико-механическими и химическими показателями уже при температуре обжига 1250 °С.

При использовании нанотехногенного сырья повышаются поверхность раздела фаз и свободная энергия поверхности частиц на границах раздела фаз [18–20]. В большинстве случаев у наноразмерных частиц дефектность минимальна, что заметно отличает их по свойствам от соответствующих макроматериалов [19–21]. Даже при небольшом количестве содержания наночастиц в системе появляется дополнительная степень свободы [19–21], поэтому энергию Гиббса можно записать в следующем виде:

$$G_i^{нк} = G_i^{мас} + \sigma f_i,$$

где $G_i^{нк}$ и $G_i^{мас}$ — энергия Гиббса нанокристаллических и массивных фаз соответственно; σ и f_i — поверхностное натяжение и поверхность частиц i -той фазы соответственно.

Использование нанотехногенного сырья способствует появлению в системе еще одного независимого параметра — дополнительной поверхности, а следовательно, появляется дополнительная степень свободы [20–23]. Поверхностная энергия является источником процесса спекания [22]. При увеличении общей поверхности раздела фаз за счет уменьшения размера частиц снижается средний радиус кривизны выпуклых участков поверхности, так как мелкие частицы обладают большей растворимостью, чем крупные [22]. Наиболее мелкие кристаллы при обжиге керамических материалов могут полностью исчезнуть. Такой процесс в общем случае способствует увеличению размеров кристаллов, выравниванию их поверхности, появлению избыточной поверхностной энергии,

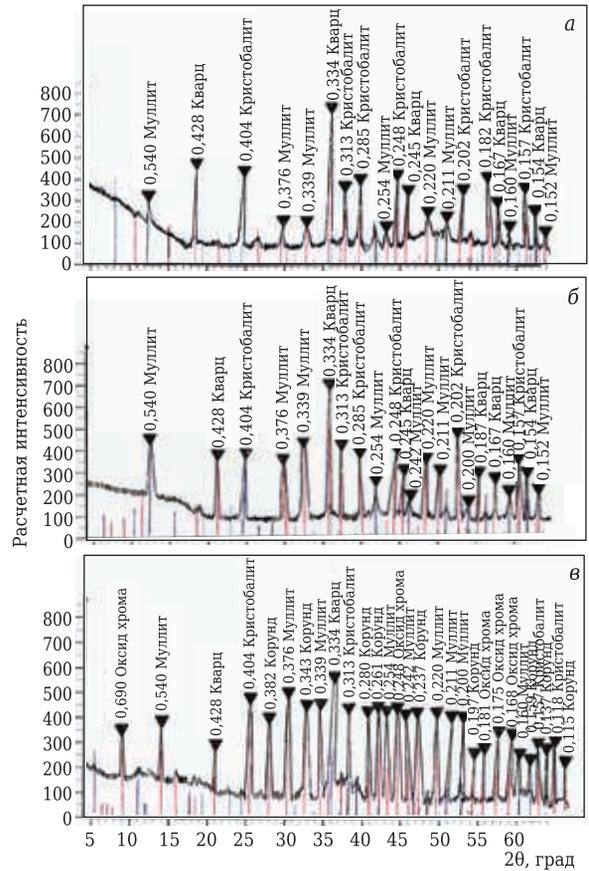


Рис. 3. Дифрактограммы образцов составов 1–3 (а–в соответственно)

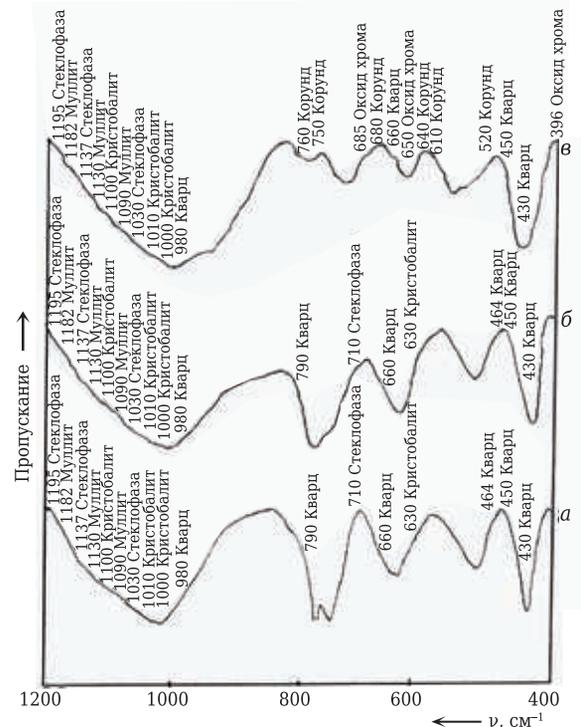


Рис. 4. ИК-спектры образцов составов 1–3 (а–в соответственно)

уменьшению между источником и поглотителями вакансий в системе расстояний, что создает возможность более плотной упаковки твердой фазы [22]. Суммарный эффект всех вышеперечисленных факторов можно определить теоретическим расчетом по диффузному механизму, обратно пропорциональному $D^{6/5}$ (D — начальный диаметр частиц). За счет использования нанотехногенного сырья в некоторых случаях удается снизить температуру обжига на 200 °С [22]. Из-за высокой поверхностной энергии элементы наноструктуры исключительно химически активны и интенсивно взаимодействуют с другими фазами системы [23–25].

На дифрактограмме порошка образца состава 1 основные интенсивные линии принадлежат муллиту, кристобалиту и кварцу (см. рис. 3, а). В исследуемом порошке возможно также присутствие примесей или других минералов, которые из-за низкой окристаллизованности и незначительного содержания (идентификация которых не может быть однозначной) на представленной дифрактограмме не показаны.

Для производства кислотоупоров и огнеупоров наиболее востребованной является система Al_2O_3 – SiO_2 . Основные соединения этой системы (силлиманит и муллит) формируют микроструктуру, фазовый состав и физико-механические показатели материала [26–28]. Кристаллические решетки муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) и силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) близки, так как муллит обладает дефектной структурой силлиманита [4, 25–28]. Поэтому дифрактограммы муллита и силлиманита практически идентичны, тогда как их ИК-спектры, наоборот, различаются, что делает спектральный анализ удобным для определения этих минералов. ИК-спектрографический анализ подтверждает присутствие в образцах состава 1 муллита (см. рис. 4, а). А-кристобалит, образовавшийся из аморфного кремнезема, который выделился в результате муллитизации, повышает проницаемость кислотоупоров и снижает их механическую прочность [4, 25, 29]. В связи с этим необходимо найти методы снижения образования кристобалита. Кристаллизация кристобалита в образцах состава 1 при 1300 °С подтверждается полосами поглощения 1100, 1010, 1000 и 630 cm^{-1} на ИК-спектре (см. рис. 4, а).

Введение шамота в керамические массы повышает интенсивность дифракционных пиков муллита (см. рис. 3, б); при этом физико-механические показатели кислотоупорных плиток также улучшаются (см. табл. 5), а введение отработанного катализатора ИМ-2201 способствует образованию корунда.

Авторы публикаций [18, 22, 30] считают, что введение в состав керамических масс глиноземсодержащего нанотехногенного сырья уменьшает содержание SiO_2 , а значит, и содержание муллита уменьшается, так как некоторая часть

Al_2O_3 выделяется в виде корунда. Кроме того, даже небольшое содержание в керамических массах CaO и R_2O (0,7–1,5 %) [4, 18, 22, 30–32] способствует образованию корунда и увеличению количества стеклофазы. Исследования показывают, что в первую очередь SiO_2 взаимодействует с щелочноземельными и щелочными оксидами. Поэтому после охлаждения вся система будет обедняться муллитом и обогащаться корундом, так как часть SiO_2 , который мог бы пойти на образование муллита, будет связан стеклофазой. В производстве некоторых видов корундовой керамики широко применяют стеклосодержащие композиции в качестве добавок, которые помимо снижения температуры спекания задерживают рост кристаллов [30]. Стеклосодержащая композиция в большинстве случаев представляет собой щелочноземельное алюмосиликатное стекло разного состава. Добавка 5–7 % минерализатора способствует образованию при спекании расплава в количестве до 10–15 %.

Система муллит – корунд позволяет реализовать проектирование составов огнеупоров с высокими целевыми свойствами с учетом кристаллохимических и физико-технических характеристик муллита и корунда [18, 22, 30–33]. Корунд отличается высокой химической стойкостью к кислотным и щелочным реагентам. При комнатной температуре на него практически не действует даже HF [25]. Кристаллизация корунда в образцах состава 3 при 1300 °С подтверждается полосами поглощения 760, 750, 680, 640, 610 и 520 cm^{-1} на ИК-спектре (см. рис. 4, в).

Введение в состав керамических масс отработанного катализатора ИМ-2201 способствует появлению на дифрактограмме оксида хрома (III) Cr_2O_3 с температурой плавления 2435 °С, кипения около 4000 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получение кислотоупорных плиток из необогащенной каолиновой глины, содержащей менее 18 % Al_2O_3 , невозможно даже при температуре обжига 1300 °С.

2. Введение в керамическую массу оптимального количества шамота (40 %) позволяет получить кислотоупорные плитки, соответствующие требованию стандарта по физико-механическим показателям при температуре обжига 1300 °С.

3. Введение в керамическую массу отработанного катализатора ИМ-2201 в количестве 40 % (как и шамота) снижает ее число пластичности от 13 до 10, так как отработанный катализатор сам имеет число пластичности 8–10, что значительно улучшает формовочную способность шихты. Использование оптимального количества отработанного катализатора в

производстве кислотоупорных материалов позволяет получить изделия с высокими физико-механическими и химическими показателями уже при температуре обжига 1250 °С.

4. При использовании нанотехногенного сырья повышаются поверхность раздела фаз и свободная энергия поверхности частиц на границах раздела фаз. Поверхностная энергия является источником процесса спекания, поэтому при высокой поверхностной энергии элементы наноструктуры исключительно химически активны и интенсивно взаимодействуют с другими фазами системы. Кроме того, дефектность наноразмерных частиц минимальна, что заметно отличает их от соответствующих макроматериалов.

5. Для производства кислотоупоров и огнеупоров наиболее востребованной является система $Al_2O_3-SiO_2$. Основные соединения системы (силлиманит и муллит) формируют микроструктуру,

фазовый состав и физико-механические показатели. ИК-спектрографический анализ подтверждает присутствие в образцах всех кислотоупорных материалов составов 1–3 муллита.

6. Введение в состав керамических масс глиноземсодержащего нанотехногенного сырья уменьшает содержание SiO_2 , а значит, и содержание муллита уменьшается, так как некоторая часть Al_2O_3 выделяется в виде корунда. Кроме того, даже небольшое содержание в керамических массах CaO и R_2O (0,7–1,5 %) способствует образованию корунда и увеличению количества стеклофазы.

7. Кристаллизация корунда в образцах состава 3 при 1300 °С подтверждается полосами поглощения на ИК-спектре.

8. Введение в состав керамической массы отработанного катализатора ИМ-2201 способствует появлению на дифрактограмме Cr_2O_3 , который обеспечивает массам огнеупорность.

Библиографический список

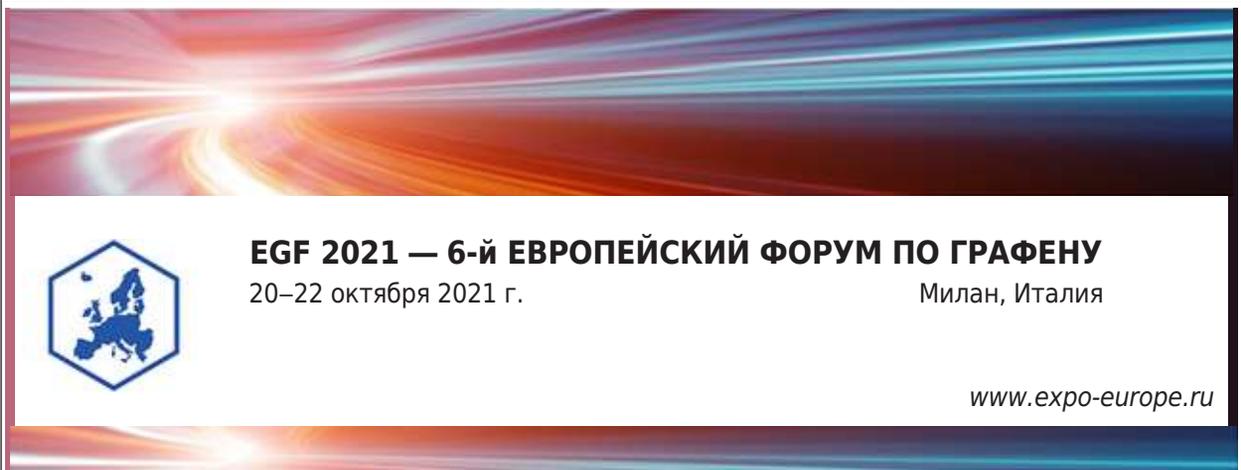
1. **Абдрахимов, В. З.** Фазовый состав клинкерного кирпича на основе отходов цветной металлургии Восточного Казахстана / В. З. Абдрахимов // Химическая технология. — 2019. — № 9. — С. 406–413.
2. **Абдрахимов, В. З.** Исследование фазового состава при различных температурах обжига керамического образца на основе ферропыли и межсланцевой глины / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Химическая технология. — 2021. — Т. 22, № 1. — С. 8–15.
3. **Абдрахимов, В. З.** Влияние попутного продукта редкоземельных металлов на фазовый состав керамогранита / В. З. Абдрахимов // Химическая технология. — 2020. — Т. 21, № 11. — С. 516–522.
4. **Абдрахимова, Е. С.** Физико-химические процессы при обжиге кислотоупоров / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов. — СПб.: Недра, 2003. — 273 с.
5. **Тюлькин, Д. С.** Характеристики отечественного сырья для производства термостойких высокотемпературных корундомуллитовых огнеупоров / Д. С. Тюлькин, П. М. Плетнев // Сб. науч. тр. междунар. конф. «СТРОЙСИБ 2016»: ресурсы и ресурсосберегающие технологии в материаловедении, Новосибирск, 2016. — С. 204–209.
6. **Абдрахимов, В. З.** Экологические и практические аспекты использования отходов цветной металлургии в производстве кислотоупоров и плиток для полов / В. З. Абдрахимов, А. К. Кайракбаев, Е. С. Абдрахимова. — Актобе: РИО Учреждение Актюбин. ун-та имени акад. С. Баишева, 2018. — 200 с.
7. **Беглов, Д. А.** Изучение влияния состава шихты на свойства плотных шамотных огнеупоров / Д. А. Беглов, Я. Н. Путаков, И. А. Остапенко, О. М. Андрусенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 6. — С. 34–38.
8. **Рыщенко, А. С.** Муллитокорундовые огнеупоры на основе синтезированного высокоглиноземистого шамота / А. С. Рыщенко, Т. Д. Рыщенко, Я. Н. Путаков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 6. — С. 64–68.
9. **Абдрахимова, Е. С.** Кислотоупорные изделия с использованием отходов цветной металлургии и нетрадиционного сырья Восточного Казахстана / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов. — Новосибирск: НГАСУ, 2000. — 100 с.
10. **Астапова, Е. С.** Влияние изотермического отжига на механические свойства и микроструктуру высокоглиноземистой керамики / Е. С. Астапова, Е. А. Ванина, И. А. Голубева // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 3. — С. 28–32.
11. **Абдрахимова, Е. С.** Исследование влияния нанотехногенного сырья и шамота на структурно-реологические свойства керамических масс и физико-механические свойства кислотоупоров / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов // Химическая технология. — 2018. — Т. 19, № 12. — С. 548–557.
12. **Abdrakhimova, E. S.** Formation of glaze coatings of clinker bricks based on raw kaolin and aluminium-containing nanotechnogenic raw materials / E. S. Abdrakhimova, V. Z. Abdrakhimov // Inorganic materials: applied research. — 2018. — Vol. 9, № 4. — P. 588–594.
13. **Абдрахимов, В. З.** Исследование фазового состава керамических материалов на основе алюмосодержащих отходов цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 3–9.
14. **Abdrakhimov, V. Z.** Use of aluminum-containing waste in production of ceramic materials for various purposes / V. Z. Abdrakhimov // Refract. Ind. Ceram. — 2013. — Vol. 54, № 1. — P. 7–16.
15. **Абдрахимов, В. З.** Применение алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения / В. З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. — 2013. — № 1. — С. 13–23.
16. **Толкачева, А. С.** Технология керамики для материалов электронной промышленности: уч. пособие. В двух частях / А. С. Толкачева, И. А. Павлова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 124 с.

16. **Хлыстов, А. И.** Повышение эффективности жаростойких композитов за счет применения химических связующих / А. И. Хлыстов, С. В. Соколова, А. В. Власов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2012. — № 9. — С. 38–42.
17. **Гаприндашвили, Г. П.** Кислотоупорные керамические материалы с применением промышленных отходов / Г. П. Гаприндашвили, М. К. Кекеладзе // Стекло и керамика. — 1988. — № 1. — С. 21–23.
18. **Кащеев, И. Д.** Свойства и применение огнеупоров. / И. Д. Кащеев. — М.: Теплотехник, 2004. — 352 с.
19. **Юльметова, Р. Ф.** Химическая термодинамика: уч.-метод. пособие / Р. Ф. Юльметова. — СПб.: 2015. — 40 с.
20. **Артемов, А. В.** Физическая химия : учебник / А. В. Артемов. — М.: ИЦ «Академия», 2013. — 288 с.
21. **Афанасьев, Б. Н.** Физическая химия : уч. пособие / Б. Н. Афанасьев, Ю. П. Акулова. — СПб.: Лань, 2012. — 454 с.
22. **Будников, П. П.** Химическая технология керамики и огнеупоров / П. П. Будников, В. Л. Балкевич, А. С. Бережной [и др.]. — М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1972. — 552 с.
23. **Зарубин, Д. П.** Физическая химия : уч. пособие / Д. П. Зарубин. — М.: Инфра, 2018. — 320 с.
24. **Попова, А. А.** Физическая химия : уч. пособие / А. А. Попова, Т. Б. Попова. — СПб.: Лань, 2015. — 496 с.
25. **Эткинс, П.** Физическая химия. Ч. 1. Равновесная термодинамика / П. Эткинс. — М.: Мир, 2007. — 494 с.
26. **Логвинков, С. М.** Муллит и соединение группы силлиманита в технологии керамики и огнеупоров / С. М. Логвинков, Н. А. Остапенко, Г. Н. Шабанова [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». — 2017. — № 49. — С. 39–48.
27. **Абдрахимова, Е. С.** Синтез муллита из техногенного сырья / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов // Журнал неорганической химии РАН. — 2007. — Т. 52, № 3. — С. 395–400.
28. **Abdrakhimova, E. S.** Study of mullite crystallization during acid-resistant material firing / E. S. Abdrakhimova, V. Z. Abdrakhimov // Refract. Ind. Ceram. — 2012. — Vol. 53, № 2. — P. 130–135.
- Абдрахимова, Е. С.** Исследование кристаллизации муллита при обжиге кислотоупоров / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. — 2012. — № 4. — С. 39–45.
29. **Кулибаев, А. А.** Физико-химические процессы, протекающие при обжиге золошлакокерамических материалов / А. А. Кулибаев, А. В. Дян, В. В. Шевандо [и др.] // Строительные материалы. — 2009. — № 9. — С. 54–56.
30. **Кащеев, И. Д.** Химическая технология огнеупоров : уч. пособие / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М.: Интернет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
31. **Pletnev, P. M.** Mullite-corundum materials based on mullite binder resistant to high-temperature deformation / P. M. Pletnev, V. M. Pogrebkov, V. I. Vereshchagin, D. S. Tyul'kin // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 618–625.
- Плетнев, П. М.** Муллитокорундовые материалы на основе муллитовой связки, стойкие к высокотемпературным деформациям / П. М. Плетнев, В. М. Погребков, В. И. Верецагин, Д. С. Тюлькин // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — С. 36–43.
32. **Абдрахимова, Е. С.** Основы технической керамики / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов. — Усть-Каменогорск: Восточно-Казахстанский гос. техн. ун-т, 2001. — 161 с.
33. **Абдрахимов, В. З.** Использование в производстве жаростойких бетонов алюмосодержащего нанотехногенного сырья и отходов углеобогащения / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Строительство и реконструкция. — 2021. — № 1. — С. 96–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105. ■

Получено 21.04.21

© Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



EGF 2021 — 6-й ЕВРОПЕЙСКИЙ ФОРУМ ПО ГРАФЕНУ
20–22 октября 2021 г. Милан, Италия

www.expo-europe.ru