ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ / ENERGY AND RESOURCE SAVING

УДК 666.774
https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85

Научная статья
Research article

CC BY NC ND

Новые технологии и составы по рециклингу отходов цветной металлургии в производство кислотоупоров без применения традиционного природного сырья

Е.С. Абдрахимова

Национальный исследовательский университет им. С.П. Королева (Самарский университет)
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

✉ Елена Сергеевна Абдрахимова (3375892@mail.ru)

Аннотация: В работе исследованы отходы цветной металлургии – глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд (ГЦИ), в целях ее использования в качестве глинистого компонента и отощителя – шамота из ГЦИ, для получения кислотоупорной плитки. Установлено, что образцы из ГЦИ (без применения отощителей), обожженные при температурах 1250–1300 °С, не соответствуют нормативным требованиям по кислотостойкости. Введение в керамическую массу 40 % шамота является оптимальным для получения обжигом при 1300 °С кислотоупоров, которые по всем показателям отвечают условиям ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные керамические», марка КШ (кислотоупорные шамотные). Увеличение содержания шамота более 40 % способствует снижению доли глинистого связующего, в результате чего уменьшается число пластичности (до менее 11) керамической массы, и на образцах при формовании появляются трещины. Исследован фазовый состав 4 образцов плиток, отличающихся содержанием компонентов – ГЦИ и шамота. На рентгенограммах образцов, обожженных при температуре 1300 °С, основные интенсивные линии принадлежат муллиту, кристобалиту, кварцу и гематиту, что подтверждают ИК-спектры. «Муллитизация» при производстве кислотоупоров имеет важное значение, так как эксплуатационные показатели определяет именно муллит. Таким образом, разработаны составы и получены кислотоупоры из отходов цветной металлургии без употребления традиционного природного сырья.

Ключевые слова: глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд (ГЦИ), шамот, кислотоупорная плитка, металлургические отходы, фазовый состав, муллит, кристобалит, кварц, гематит.

Для цитирования: Абдрахимова Е.С. Новые технологии и составы по рециклингу отходов цветной металлургии в производство кислотоупоров без применения традиционного природного сырья. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(2):76–85.
https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85

New technologies and compositions for recycling non-ferrous metallurgical waste into acid-resistant ceramics without using traditional natural raw materials

E.S. Abdrakhimova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University)
34 Moscow Ave., Samara, 443086, Russia

✉ Elena S. Abdrakhimova (3375892@mail.ru)

Abstract: This study investigates non-ferrous metallurgy waste – specifically, the clay fraction of zircon-ilmenite ore gravity separation tailings (ZIGT) – with the aim of using it as both a clay component and a non-plastic additive (chamotte derived from ZIGT) in the production of acid-resistant ceramic tiles. It was found that samples made solely from ZIGT (without any additives), fired at temperatures of 1250–1300 °C, do not meet regulatory requirements for acid resistance. Introducing 40 wt. % chamotte into the ceramic body was found to be optimal for producing

© 2025 г. Е.С. Абдрахимова

acid-resistant tiles at 1300 °C that comply with all requirements of GOST 961-89 Acid-Resistant and Thermo-Acid-Resistant Ceramic Tiles, grade KSh (chamotte-based acid-resistant tiles). Increasing the chamotte content beyond 40 wt.% reduces the clay binder fraction, which in turn lowers the plasticity index (to below 11), causing cracks to form in the samples during shaping. The phase composition of four tile samples with varying ZIGT and chamotte contents was analyzed. *X*-ray diffraction patterns of the samples fired at 1300 °C revealed prominent peaks corresponding to mullite, cristobalite, quartz, and hematite, which were also confirmed by IR spectroscopy. The formation of mullite is crucial in the production of acid-resistant ceramics, as mullite is the primary phase determining the operational properties of the material. As a result, new ceramic compositions were developed and acid-resistant tiles were obtained from non-ferrous metallurgy waste without the use of conventional natural raw materials.

Keywords: clay fraction of zircon-ilmenite ore gravity tailings (ZIGT), chamotte, acid-resistant ceramic tiles, metallurgical waste, phase composition, mullite, cristobalite, quartz, hematite.

For citation: Abdrakhimova E.S. New technologies and compositions for recycling non-ferrous metallurgical waste into acid-resistant ceramics without using traditional natural raw materials. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy.* 2025;31(2):76–85.
https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85

Введение

Физико-химические процессы, включающие фазовые превращения, в результате которых формируются более прочные кислотостойкие минералы, происходят изменения морфологических свойств, кристаллических фаз и текстуры, которые в комплексе формируют в большей части эксплуатационные свойства кислотоупоров. Поэтому при термообработке кислотоупорных изделий этим процессам уделяется особое внимание. Химическая промышленность, черная и цветная отрасли металлургии и большинство экологически вредных предприятий настроены на увеличение производства доступных кислото- и огнеупорных изделий. Поэтому необходимо осваивать выпуск такой продукции не из дорогостоящих традиционных естественных сырьевых материалов, а из дешевых отходов производства.

Под воздействием металлургических производств масштабные площади становятся промзонами, которые охватывают не только густонаселенные районы, но и сельскохозяйственные угодья, территории, рассчитанные для строительства зданий для жилья и сооружений для различных производств и даже водоохранные зоны [1—4], вследствие чего на промышленно-урбанизированных территориях неблагоприятно обостряется экологическая ситуация.

Специфичность металлургических предприятий способствует негативным контактам отходов производств с окружающей средой, что отрицательно сказывается на состоянии здоровья населения, присутствующего на данной территории. Вместе с тем масштабное содержание крупнотоннажных отходов производств металлургии приводит к загрязнению почвы, близлежащих водоемов и отравлению экологических систем [5; 6]. По уровню загрязнения окружающей среды металлургические предприятия занимают 2-е место после топливно-энергетического комплекса.

По данным некоторых экологов и исследователей, зародившаяся экологическая опасность классифицируется как дефицит редуцентов, которые относятся к группе так называемых мусорщиков, которые вследствие радикального увеличения объема техногенного сырья уже не в состоянии ликвидировать (или разложить) такой вид отходов на микросоставляющие [7]. Они различаются по химическому составу с природными естественными материалами, а бактерий (микроорганизмов), например редуцентов, для их разложения явно недостаточно [7—9]. Комплексное материаловедение предусматривает формирование безотходных технологий, регламентирующих повторное использование отходов производств для изготовления востребуемой продукции. Такой рециклинг сэкономит субсидирование геологоразведочных работ и функционирование карьера, и при этом высвобождаются масштабные пространства от негативного влияния антропогенных факторов.

Металлургия XXI в. — это не только конкурентоспособные передовые технологии, но и образование вредных отходов и создание агрессивных сред на предприятиях. В таких случаях от непосредственного открытого соприкосновения человека с ядовитыми агрессивными средами и их компонентами, а также разрушения поверхности стен и пола защищают кислотоупоры (КУ). Чаще всего это керамические материалы (трубы, кирпичи, плитки и различные фасонные детали), которые обладают абсолютной стойкостью к влиянию разнообразных агрессивных сред.

В работе [10] авторы установили, что если заменить КУ-кирпич на КУ-плитку, то затраты на использование сырья снизятся в 2,5—3,0 раза. Кроме

того, за счет меньшей толщины плитки сокращаются операции по ее сушке и обжигу. Кислотоупорная плитка — это стабильно устойчивый и долгосрочный заслон от контакта и соприкосновения активно-агрессивных элементов патогенной среды с работающим персоналом. Такая плитка способна качественно заменить дорогостоящие металлические агрегаты и аппараты, так как она не только значительно дешевле, но и не подвержена коррозии [11].

Для производства качественных кислотоупоров требуется алюмосиликатное сырье с высоким содержанием оксидов алюминия глинистых материалов (Al_2O_3 > 20 %) и отощителей (Al_2O_3 > > 25÷30 %), которые, однако, на многих территориях России либо отсутствуют, либо исчерпываются [6; 11]. На геологоразведочные работы по поиску сырьевых материалов в настоящее время финансирование не планируется [6], что обусловливает целесообразность замены естественного сырья на отходы производств. Кроме того, при рециклинге техногенного сырья в желательный товар [6] будет достигнута цель экологической безопасности, которая прописана в документе ЕС 2008/98/ЕС.

Таким образом, истощение доминирующих для промышленного производства кислотоупоров сырьевых компонентов вызвало рациональную ротацию естественного природного сырья на отходы техногенных производств, что не только позволит производить различные товары, но и будет способствовать охране экологических систем.

Цель работы — рециклинг и утилизация глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых (ГЦИ) руд, являющейся техногенным сырьем цветной металлургии и используемой в качестве глинистого вяжущего, связующего, а также исследование фазового состава керамических плиток, полученных при обжиге кислотоупоров.

Методика исследования

Для анализа элементного химического состава и микроструктуры сырьевых компонентов использовали растровый электронный микроскоп JSM 6390A фирмы Jeol (Япония). Петрографические исследования сырьевых компонентов проводили с применением иммерсионных жидкостей, прозрачных шлифов и аншлифов под микроскопами МИН-8 и МИН-7. Качественные минеральные (фазовые) составы образцов анализировали на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 (НПП «Буревестник», Россия) с CuK_α-излучением и β-фильтром, а также спектрофотометре «Spekord 75JR» (Carl Zeiss, Германия).

Базовые химико-физические показатели и технологические свойства ГЦИ: фракционный состав, пластичность, усадка, чувствительность к сушке, влагопроводность, спекаемость, огнеупорность, водопоглощение, прочность и т.д., определялись и анализировались по лабораторным практикумам и результатам работ [12—15].

В роли связующего для производства кислотоупоров использовалась ГЦИ, которая является отходом цветной металлургии, а в качестве отощителя — шамот из ГЦИ, обожженной при температуре 1200 °С. Их химические составы: оксидный и поэлементный, представлены в табл. 1 и 2, а

Таблица 1. **Усредненный оксидный химический состав компонентов**

Table 1. Average oxide composition of the components

Материал	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO_2	$Al_2O_3 + TiO_2$	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	ZrO_2	ППП*
ГЦИ	58,77	22,43	6,74	1,28	1,54	1,58	0,82	7,04
Шамот	61,02	25,18	7,58	1,54	1,89	1,93	0,86	–

* ППП – потери при прокаливании; $R_2O = Na_2O + K_2O$.

Таблица 2. **Элементный химический состав компонентов**

Table 2. Elemental composition of the components

Материал	Содержание элементов, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	K	Zr	Ca	Fe
ГЦИ	2,18	50,78	0,26	0,54	15,45	24,8	0,32	0,48	0,2	4,87
Шамот	–	48,22	0,31	0,71	17,18	27,14	0,35	0,54	0,22	5,18

микроструктура и минералогический состав — на рис. 1 и 2.

Глинистый компонент (ГЦИ) образуется в виде гомогенной суспензии с влажностью 37—45 % и плотностью 2,36—2,42 г/см^3 после грохочения и дезинтеграции добываемой руды [6; 16]. Обзор литературы и многочисленные исследования показали, что сформованная из гомогенного глинистого сырья керамика имеет прочность на 10—15 % выше, чем из глины, взятой непосредственно в карьере [16—19].

По составу Al_2O_3 ГЦИ относится к полукислому сырью с повышенным содержанием красящих оксидов (Fe_2O_3 более 3 %, см. табл. 1), по количеству частиц размером <0,001 мм (58 %, табл. 3) — к дисперсному, по пластичности — к среднепластичному (число пластичности 21—23), по чувствительности к сушке — к среднечувстви-

Таблица 3. **Фракционный состав глинистого компонента (ГЦИ)**

Table 3. Particle size distribution of the clay component (ZIGT)

Содержание фракций, %	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
Размер частиц, мм	0,8	8,1	12,1	21,0	58

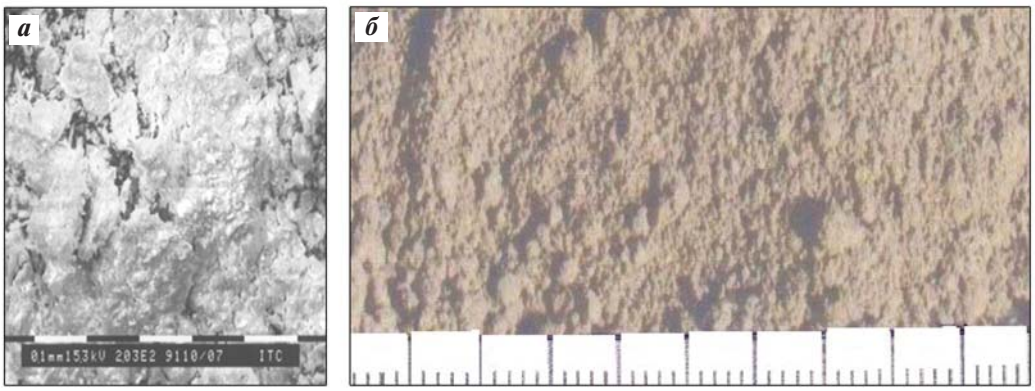

Рис. 1. Микроструктура сырьевых материалов: ГЦИ (***а***) и шамота из ГЦИ (***б***)

Увеличение 1000$^\times$ (***а***) и 10$^\times$ (***б***)

Fig. 1. Microstructure of raw materials: ZIGT (***а***) and chamotte derived from ZIGT (***б***)

Magnification: 1000$^\times$ (***а***), 10$^\times$ (***б***)

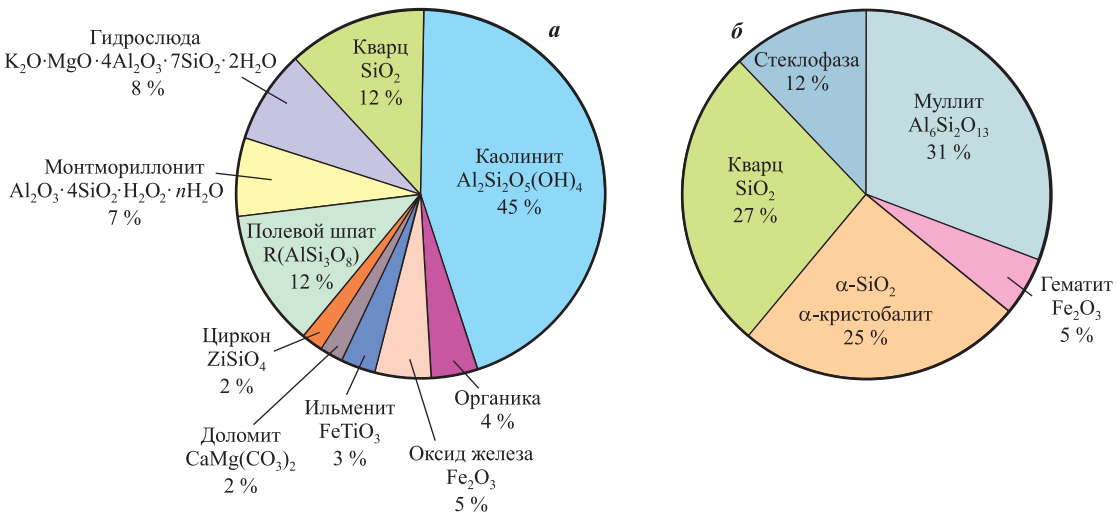

Рис. 2. Минералогический состав сырьевых материалов: ГЦИ (***а***) и шамота из ГЦИ (***б***)

Fig. 2. Mineralogical composition of the raw materials: ZIGT (***а***) and chamotte derived from ZIGT (***б***)

тельному, по огнеупорности — к тугоплавкому (t = 1580 °С), по спекаемости — к сильноспекающемуся с интервалом спекания 120—150 °С.

В составе ГЦИ основным глинистым минералом является каолинит (рис. 2), который заметно отличается от природных чисто каолинитовых глин. Повышенное содержание оксида железа (Fe_2O_3 > 3 %) способствует образованию плохо окристаллизованного минерала каолинита, так как в нем происходит частичное замещение ионов алюминия (Al^{3+}) ионами железа (Fe^{3+}), в результате чего образуется твердый раствор, причем ионы железа из кристаллической решетки практически неудалимы без ее деструкции [16; 20—23]. По индексу кристалличности каолинита, который равен 0,68, ГЦИ относится к 3-му классу, причем автор монографии [20] считает, что чем меньше упорядочена структура каолинита, тем лучше он способствует повышению реакционной способности.

Термообработкой ГЦИ при 1200 °С был получен шамот, который обычно используется в керамических материалах в качестве отощителя. Он стабилизирует усадку при обжиге, способствует созданию прочного каркаса и контролирует пластичность композиции. В табл. 1 показано, что после отжига глинистое сырье обогатилось оксидом алюминия с 22,43 до 25,18 %.

Получение кислотоупорных плиток и их технические показатели

Квадратные КУ-плитки типа ПК-1 размером 100×100×20 мм получали по классической технологии: ГЦИ и шамот измельчали до размера частиц не более 1 мм и тщательно перемешивали (табл. 4). Керамические образцы производили пластическим способом при влажности шихты 22—24 %. После прессования их высушивали до влажности не более 5 %, затем подвергали отжигу при температурах 1250 и 1300 °С. В табл. 5 представлены их физико-механические (технические) показатели.

На рис. 3 представлены рентгенограммы образцов *1* и *4*, обожженных при температуре 1300 °С, а на рис. 4 — их ИК-спектры. Образцы *1* показаны для сопоставления, а образцы *4* имеют оптимальные технические показатели. Следует отметить, что возможные примеси или минералы с плохой окристаллизованностью, идентификация которых не может быть однозначной из-за незначительного содержания, на дифрактограмме не приводятся.

Результаты и их обсуждение

Данные табл. 5 показывают, что образцы из состава *1*, обожженные при температурах 1250—1300 °С, не отвечают требованию ГОСТ по кислотостойкости. Введение в керамическую массу 20—40 % шамота значительно улучшает сушильные параметры полуфабриката (см. табл. 4). После обжига при 1300 °С образцы удовлетворяют всем требованиям ГОСТ для кислотоупорной плитки (см. табл. 5).

К оптимальному следует отнести состав *4*, содержащий 40 % шамота, так как он по показателям превосходит образцы *1—3* (табл. 5). Кроме того, при выборе оптимального состава следует учитывать еще и связующую способность (пластичность)

Таблица 4. **Составы образцов, пластичность шихты и показатели полуфабрикатов после сушки**
Table 4. Sample compositions, plasticity of the ceramic body, and characteristics of semi-finished products after drying

Компонент	Содержание компонентов, мас. %			
	Обр. *1*	Обр. *2*	Обр. *3*	Обр. *4*
ГЦИ	100	80	70	60
Шамот	–	20	30	40
Пластичность керамической массы	22	17	14	11
Показатели полуфабрикатов после сушки				
Усадка высушенной плитки, %	6,8	6,1	5,3	4,8
Время сушки плитки (до постоянной усадки) в интервале t = 100÷120 °С, ч	1,2	1,1	1,0	0,8
Механическая прочность высушенного сырца при сжатии до остаточной влажности 5 %, МПа	7,8	5,2	3,9	2,7
Водопроводность, 10^{-4} м^2/ч	1,80	2,89	3,50	4,30

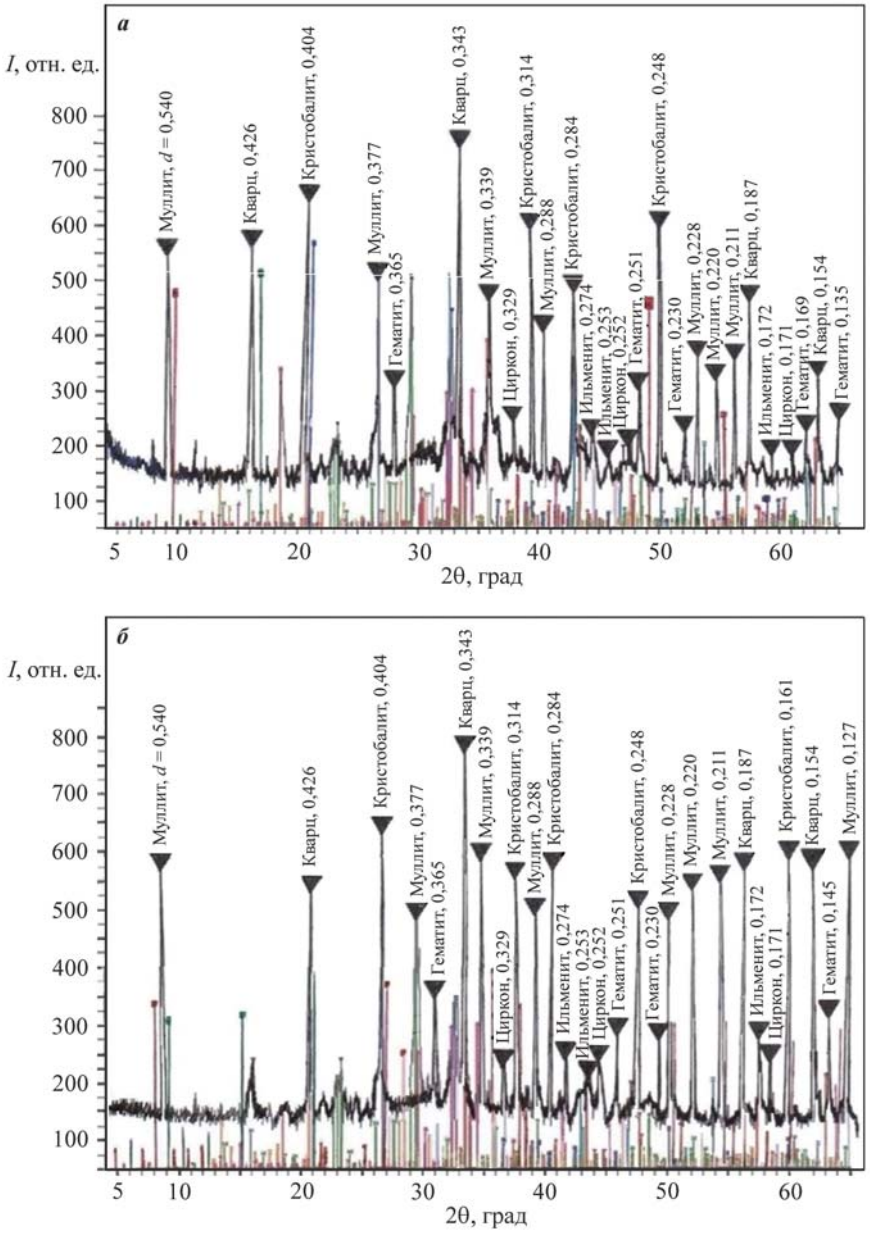

Рис. 3. Рентгенограммы образцов *1* (***а***) и *4* (***б***)

d, нм – межплоскостное расстояние между плоскостями одного семейства параллельных плоскостей

Fig. 3. *X*-ray diffraction patterns of samples *1* (***а***) and *4* (***б***)

d, nm – interplanar spacing between planes of the same family of parallel crystallographic planes

глинистого компонента, так как при ее снижении до менее 11 на образцах при формовании появляются трещины.

В образцах составов *1* и *4* рентгеновские исследования выявили наличие муллита, кристобалита, кварца и гематита, что подтверждают данные рис. 3 и 4. В системе Al_2O_3—SiO_2 формируется не только муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), но и силлиманит ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), кристаллические решетки которых имеют определенную схожесть, так как первый обладает дефектом несовершенной структуры силлиманита, поэтому у них рентгенограммы тождественны, а ИК-спектры разные [17; 20; 23—26].

Кристаллизация α-кристобалита чаще всего происходит из аморфного кремнезема, который выделяется при образовании муллита. Такой кристобалит за счет своего расширения повышает проницаемость кислотоупоров, а механическую прочность снижает [12; 14—16; 19; 20].

В работах [2; 29; 30] показано, что в керамике

Таблица 5. **Физико-механические показатели кислотоупорных плиток**

Table 5. Physical and mechanical properties of acid-resistant tiles

Показатель	Обр. *1*	Обр. *2*	Обр. *3*	Обр. *4*	Нормативные требования*
Температура обжига 1250 °С					
Водопоглощение, %	3,8	3,8	3,7	3,6	<5
Кислотостойкость, %	96,5	96,9	97,4	97,7	>98
Предел прочности при сжатии, МПа	57,2	58,1	59,3	60,1	>50
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	32,4	32,9	33,6	34,3	>25
Морозостойкость, циклы	42	44	46	47	>20
Термическая стойкость, теплосмены	4	4	5	6	>5
Температура обжига 1300 °С					
Водопоглощение, %	2,3	2,3	2,2	2,2	<5
Кислотостойкость, %	97,8	98,2	98,5	98,7	>98
Предел прочности при сжатии, МПа	63,8	65,4	67,8	69,4	>50
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	38	39	41	42	>25
Морозостойкость, циклы	58	63	67	69	>20
Термическая стойкость, теплосмены	6	6	8	9	>5

* ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные» керамические, марка КШ (кислотоупорные шамотные).

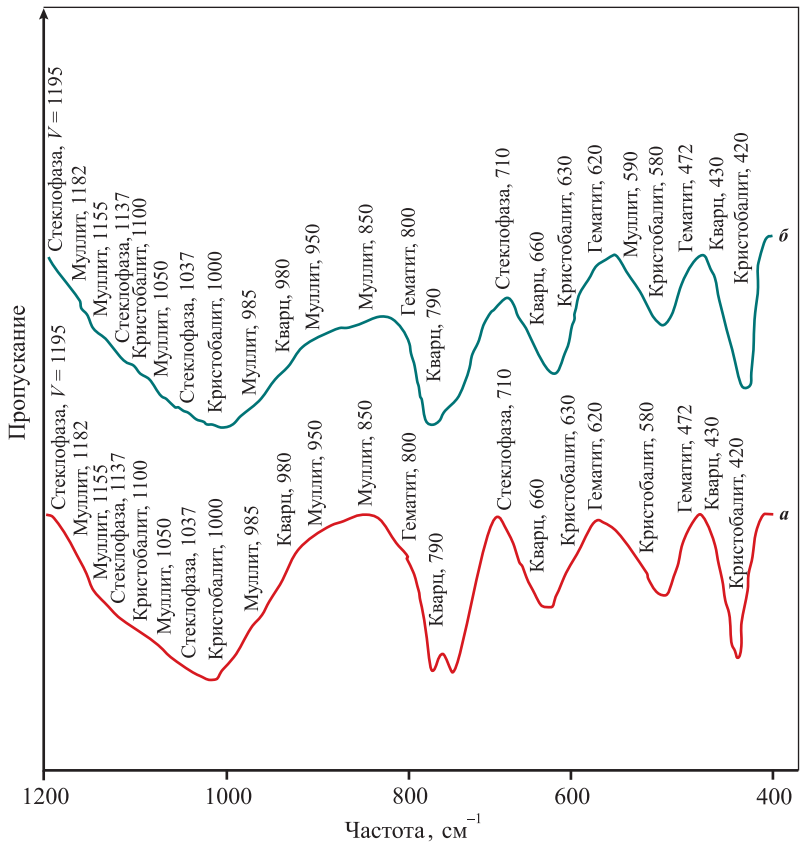

Рис. 4. ИК-спектры исследуемых образцов *1* (***а***) и *4* (***б***)

Fig. 4. IR spectra of samples *1* (***а***) and *4* (***б***)

гематит интенсифицирует формирование железистого стекла, которое «цементирует» изделие. В процессе обжига в исследуемых образцах формируется стеклофаза различного состава (в зависимости от температуры обжига), присутствие которой подтверждают ИК-спектры (рис. 4). Она активизирует дефектность структуры при термообработке образцов, повышает количество механических напряжений, ослабляет решетку минералов (фаз) и даже может ее растворить, а также препятствует образованию некоторых фаз, например муллита [11; 31]. Начало кристаллизации структурно несовершенного муллита активизирует обжиг при температуре более 1100 °С.

Сформировавшаяся стеклофаза даже при ограниченном содержании способствует усилению спекания черепка — адгезии частицы керамической массы в конгломерат, и может стимулировать процессы обжига керамики в целом.

Выводы

1. Выявлено, что термообработанные образцы из глинистых хвостов гравитации циркон-ильменитовых руд при температурах 1250—1300 °С не удовлетворяют требованию ГОСТ 961-89 по кислотостойкости. Введение в керамическую массу от 20 до 40 % шамота заметно улучшает сушильные свойства полуфабриката (кроме показателя прочности), а после обжига при 1300 °С они соответствуют всем нормативным требованиям для кислотоупорной плитки.

2. Установлено, что оптимальным является состав образца 4, так как он отвечают всем требованиям ГОСТ для кислотоупорной плитки. При этом следует учитывать еще и связующую способность (пластичность) глинистого связующего, так как при ее снижении число пластичности керамической массы становится менее 11 и на образцах при формовании появляются трещины.

3. Рентгеновские исследования показали, что в образцах составов *1* и *4* основные интенсивные линии принадлежат муллиту, кристобалиту, кварцу и гематиту, что подтверждают ИК-спектры. Также в них обнаружено наличие стеклофазы, которая негативно влияет на структуру минерала.

Список литературы/References

1. Коряков В.Е., Шишкина А.А., Шишкина П.А. Влияние предприятий металлургической промышленности на окружающую среду и здоровье человека. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019;(4):275—278.
Koryakov V.E., Shishkina A.A., Shishkina P.A. The influence of metallurgical industry enterprises on the environment and human health. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2019;(4):275—278. (In Russ.).
2. Patel A., Enman J., Gulkova A., Guntoro P.I., Dutkiewicz A., Ghorbani Y., Matsakas L. Integrating biometallurgical recovery of metals with biogenic synthesis of nanoparticles. *Chemosphere*. 2020;263(12):1—23. http://doi.org/10.1016/j. chemosphere.2020.128306
3. Zhang Y., Xiong Z., Yang L., Ren Z., Shao P., Shi H., Luo X. Successful isolation of a tolerant co-flocculating microalgae towards highly efficient nitrogen removal in harsh rare earth element tailings (REEs) wastewater. *Water Research*. 2019;166 (8):18—24. http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115076
4. Politaeva N.A., Smyatskaya Y.A., Dolbnya I.V., Sobgaida D.S. Microalgae biotechnology multiple use of chlorella sorokiniana. In: *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. (November 27—29, 2020) Saint Petersburg, 2020. P. 252—261.
5. Абдрахимов Д.В., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Влияние некоторых отходов производств цветной металлургии на физические и механические свойства кирпича *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2004;(2):4—9.
Abdrakhimov D.V., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. The influence of some waste products of nonferrous metallurgy on the physical and mechanical properties of bricks. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2004; (2):4—9. (In Russ.).
6. Пасмурцева Н.Н. Основные тенденции и проблемы инновационного развития металлургической промышленности Российской Федерации. *Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические и правовые исследования*. 2018;(4): 219—231. http://doi.org/10.21684/2411-7897-2018-4-4-219-231
Pasmurtseva N.N. Main trends and problems of innovative development of the metallurgical industry of the Russian Federation. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Sotsial'no-ekonomicheskie i pravovye issledovaniya*. 2018;4:219—231. (In Russ.). http://doi.org/10.21684/2411-7897-2018-4-4-219-231
7. Медведева И. В., Амирова Е.В., Студенток Г.А., Цейтлин Е.М., Медведева О.М. Воздействие предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду и направления его снижения. *Известия УГГУ*. 2023;4(72):116—126. http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-116-126

Medvedeva I. V., Amirova E.V., Studentok G.A., Tseitlin E.M., Medvedeva O.M. Environmental impact of mining and metallurgical enterprises in the Sverdlovsk region and ways to reduce it. *Izvestiya UGGU*. 2023;4(72): 116—126. (In Russ.).
http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-116-126

8. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания — интегральный критерий качества жизни. *Экология и промышленность России*. 2019;11:50—54.
http://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-50-55
Kalner V.D. Ecologically oriented habitat — an integral criterion of quality of life. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019;11:50—54. (In Russ.).
http://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-50-55
9. Кряжев А.М., Гусев Т.В., Тихонова И.О., Очеретенко Д.П., Алмгрен Р. Целлюлозно-бумажное производство: устойчивое развитие и формирование экономики замкнутого цикла. *Экология и промышленность России*. 2020;11:48—53.
http://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-11-48-53
Kryazhev A.M. Gusev T.V., Tikhonova I.O., Ocheretenko D.P., Almgren R. Pulp and paper production: sustainable development and formation of a closed-cycle economy. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2020;11: 48—53. (In Russ.).
http://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-11-48-53
10. Гаприндашвили Г.П., Кекеладзе М.К. Кислотоупорные керамические материалы с применением промышленных отходов. *Стекло и керамика*. 1988;(1):21—23.
Gaprindashvili G.P., Kekeladze M.K. Acid-resistant ceramic materials using industrial waste. *Steklo i keramika*. 1988;(1):21—23. (In Russ.).
11. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Физико-химические процессы при обжиге кислотоупоров. СПб.: Недра, 2003. 273 с.
12. Женжурист И.А. Структура, свойства и технологии керамических материалов: С 87 практикум. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2021. 47 с.
13. Абдрахимов В.З., Абдрахимов А.В., Вдовина Е.В., Абдрахимова Е.С. Технология производства керамических изделий. Учебно-методическое пособие для лабораторных работ. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2007. 120 с.
14. Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. Исследование свойств глинистого сырья методами физико-химического анализа. *Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024;(4):16—25. http://doi.org/10.17513/use.37919
Ushnitskaya N.N., Mestnikov A.E. Investigation of the properties of clay raw materials by methods of physicochemical analysis. *Vestnik Belgorodskogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2024;(4):16—25. http://doi.org/10.17513/use.37919
15. Сулейменов С.Т., Ралко А.В., Сайбулатов С.З., Нурбатуров К.А. Влагопроводность зологлиняной смесей. *Строительные материалы и конструкции*. 1981;(3):31—35.
Suleimenov S.T., Ralko A.V., Saibulatov S.Z., Nurbaturov K.A. Moisture conductivity of zologlin mixtures. *Stroitel'nye materialy i konstruktsii*. 1981;(3):31—35. (In Russ.).
16. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Использование отходов цветной металлургии в производстве кислотоупоров. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2004;(4):13—18.
Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. The use of non-ferrous metallurgy waste in the production of acid-resistant. *Izestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2004;(4): 13—18. (In Russ.).
17. Кингери У.Д. Введение в керамику. М.: Наука, 1964. 529 с.
18. Турсукова И.И., Байметова М.Г. Методический подход к оценке эффективности деятельности металлургического предприятия в условиях экологических рисков. *Экономика, предпринимательство и право*. 2024;14 (2):277—288.
http://doi.org/10.18334/epp.14.2.120551
Tursukova I.I., Baymetova M.G. Methodological approach to assessing the effectiveness of a metallurgical enterprise in the context of environmental risks. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo*. 2024;14(2):277—288. (In Russ.).http://doi.org/10.18334/epp.14.2.120551
19. Chen J., Min Fan-fei, Liu Ling-yun, Jia Fei-fei. Adsorption of methylamine cations on kaolinite basal surfaces: A DFT study. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020; 56(2):338—349.
http://doi.org/10.37190/ppmp/117769
20. Августиник А.И. Керамика. Л.: Лениздат, 1975. 591 с.
21. Четверикова А. Г., Макаров В.Н., Каныгина О.Н., Серегин М.М., Строганова Е.А. Коррекция структурной формулы каолинита Оренбургской области спектроскопическими методами. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2):277—291.
https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11108
Chetverikova A.G., Makarov V.N., Kanygina O.N., Seregin M.M., Stroganova E.A. Correction of the structural formula of kaolinite of the Orenburg region by spectroscopic methods. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. 2023;25(2):277—291. (In Russ.). https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11108

22. Liu Y., Huang Q., Zhao L., Lei S. Influence of kaolinite crystallinity and calcination conditions on the pozzolanic activity of metakaolin. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management.* 2021:39—56. https://doi.org/10.24425/gsm.2021.136295
23. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Синтез муллита из техногенного сырья. *Журнал неорганической химии.* 2007;52(3):395—400.
Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Synthesis of mullite from technogenic raw materials. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 2007;52(3):395—400. (In Russ.).
24. Biswal B., Mishra D.K., Das S.N., Bhuyan S. Structural, micro-structural, optical and dielectric behavior of mullite ceramics. *Ceramics International.* 2021;47(22):32252—32263. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.120
25. Weiquan Yuan, Jingzhong Kuang, Zheyu Huang, Mingming Yu. Effect of aluminum source on the kinetics and mechanism of mullite preparation from kaolinite. *Chemical Physics Letters.* 2022;787:139—242. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139242
26. Яроцкая Е.Г., Федоров П.П. Муллит и его изоморфные замещения. *Конденсированные среды и межфазные границы.* 2018; 20(4):573—54. https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/626
Yarotskaya E.G., Fedorov P.P. Mullite and its isomorphic substitutions. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. 2018;20(4):573—544. (In Russ.). https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/626
27. Мощняга М.А., Гринберг Е.Е., Почиталкна И.А. Получение высокочистого кристобалита с использованием «золь-гель»-алкоголятной технологии. *Успехи химии и химической технологии*. 2021;35(6): 75—76.
Moshnyaga M.A., Grinberg E.E., Pochitalkna I.A. Obtaining high-purity cristobalite using sol-gel -alcoholic technology. *Uspekhi khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2021;35(6):75—76. (In Russ.).
28. Котляр В.Д., Терёхина Ю.В. Минералого-химические и структурные особенности опоковидных опал-кристобалитовых пород как сырья для стройиндустрии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(1): 145—155. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852
Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V. Mineralogical, chemical and structural features of opiate opal-cristobalite rocks as raw materials for the construction industry. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2023;334(1):145—155. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852
29. Павлов В.Ф., Мещерякова И.В. Роль оксида железа в формировании структуры кислотоупорного фарфора. В сб.: *Труды НИИ «Стройкерамика». Научные исследования в области механизации технологических процессов, разработки новых составов масс и глазурей*. 1982. С. 48—56.
30. Павлов В.Ф., Мещерякова И.В. Влияние добавки железосодержащих легкоплавких глин на изменение фазового состава и свойств кислотоупоров. В сб.: *Труды НИИ «Стройкерамика». Совершенствование технологии в производстве строительной керамики.* 1981. С. 109—115.
31. Павлов В.Ф. Влияние состава и строения жидкой фазы керамических масс на формирование структуры изделий из них при обжиге. В сб.: *Труды НИИ «Стройкерамика».* 1977. № 42. С. 123—154.

Информация об авторе

Елена Сергеевна Абдрахимова – к.т.н., доцент кафедры «Химия» Национального исследовательского университета им. С.П. Королева (Самарского университета).
https://orcid.org/0009-0009-0001-5941
E-mail: 3375892@mail.ru

Information about the author

Elena S. Abdrakhimova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department "Chemistry", Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University).
https://orcid.org/0009-0009-0001-5941
E-mail:3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.08.2024, доработана 07.10.2024, подписана в печать 14.10.2024
The article was submitted 07.08.2024, revised 07.10.2024, accepted for publication 14.10.2024