

УДК: 666.774.017.532

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.4

EDN: CHKFGR



Влияние отходов черной металлургии на фазовый состав и химическую стойкость кислотоупорных материалов с оценкой экологической целесообразности их применения

В.З. Абдрахимов¹

¹Самарский государственный экономический университет,
г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Несмотря на возрастающую потребность в кислотоупорных материалах, объем исследований, посвященных кислотостойкости керамических изделий, остается недостаточным. В частности, механизмы, обеспечивающие повышение данного эксплуатационного показателя, изучены не в полной мере. Современная черная металлургия, в наибольшей степени должна решать приоритетные вопросы в области повышения энергоэффективности, сокращения объемов отходов, сведения их к минимуму негативного воздействия на окружающую среду и повышать экологическую безопасность. В связи с истощением запасов высококачественного природного сырья для производства кислотоупоров возникла необходимость замены традиционного сырья крупнотоннажными отходами предприятий черной металлургии, характеризующимися повышенным содержанием огнеупорных оксидов магния и хрома. *Цель работы:* исследовать влияние шламовых хвостов обогащения хромовых руд, содержащих повышенное количество огнеупорных оксидов магния и хрома, на химическую стойкость и фазовый состав кислотоупоров на основе каолиновой глины. *Задачами исследования являются:* комплексное изучение физико-химических и технологических характеристик шламовых хвостов обогащения хромовых руд как отощающего компонента и необогащенной огнеупорной глины; а также обоснование возможности получения на их основе кислотоупорной плитки с повышенными показателями кислотостойкости и физико-механических свойств.

Результаты. Исследования показали, что из каолиновой необогащенной глины не представляется возможным получить в диапазоне температур 1300-1350°C соответствующие стандартам кислотоупорные плитки. Введение в составы оптимального количества шамота (40%) в керамическую массу позволяет получить кислотоупорные плитки, соответствующие нормативным требованиям при температуре обжига 1350°C. Образцы оптимального состава содержат высокоогнеупорные минералы и соединения высшей огнеупорности — фазы, способные противостоять действию высоких температур: магнезиальную шпинель, форстерит, хромит и магнезиохромит. Эти фазы обуславливают повышение не только кислотостойкости, но и огнеупорности материала.

Выводы. Установлено, что введение в керамическую массу прокаленных шламовых «хвостов» обогащения хромитовых руд в количестве 40% значительно повышают технические показатели при температуре 1350°C

Ключевые слова: кислотостойкость, кислотоупорная плитка, отходы хромитовых руд, необогащенная глина, шамот

Для цитирования: Абдрахимов В.З. Влияние отходов черной металлургии на фазовый состав и химическую стойкость кислотоупорных материалов с оценкой экологической целесообразности их применения // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 45-57, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.4, EDN: CHKFGR

Environmentally sound diagnostics on the use and impact of ferrous metallurgy waste on chemical resistance and phase composition of acid-resistant materials

V.Z. Abdrakhimov¹

¹Samara State University of Economics, Samara. Russian Federation

Abstract. Problem statement. The need for acid-resistant materials is noticeably increasing, but nevertheless the number of works devoted to the study of acid resistance of ceramic products is clearly insufficient. In particular, a sufficient amount of work has not been carried out on the mechanism of increasing this indicator. Modern ferrous metallurgy should most of all address priority issues in the field of energy efficiency improvement, waste reduction, minimizing negative environmental impacts and improving environmental safety. Due to the depletion of high-quality natural raw material reserves for the production of acid-resistant materials, it has become necessary to replace traditional raw materials with large-volume waste products from the ferrous metallurgy industry, which are characterized by a high content of refractory magnesium and chromium oxides. **The purpose of the work:** to analyze the influence of sludge tailings of the enrichment of chromium ores containing an increased amount of refractory oxides, magnesium ($\text{MgO} > 35\%$), chromium ($\text{Cr}_2\text{O}_3 > 25\%$), on the chemical resistance and phase composition of acid resisters based on kaolin refractory clay. The objectives of the study are: to specify the key parameters of sludge tailings for the enrichment of chromium ores as a purifier and non-enriched refractory clay for the production of acid-resistant tiles with increased acid resistance and physical and mechanical properties. Results. Studies have shown that it is impossible to obtain acid-resistant tiles from kaolin non-enriched clay in the temperature range $1300\text{--}1350^\circ\text{C}$. which would follow state code and standards. The introduction of an optimal amount of chamotte 40% into the ceramic mass makes it possible to obtain acid-resistant tiles that meet the requirements of state standards at a firing temperature of 1350°C . Samples from the optimal composition contain highly refractory minerals (highly refractory compounds capable of resisting high temperatures from 1770 to 2000°C): magnesia spinel (MgAl_2O_4 , fire resistance 2135°C), forsterite (Mg_2SiO_4 , fire resistance 1810°C), chromite (FeCr_2O_4 , fire resistance 2180°C), magnochromite (MgCr_2O_4 , fire resistance 2330°C), which increase not only acid resistance, but also fire resistance. **Conclusions.** It was found that the introduction of calcined slurry "tailings" of chromite ore enrichment in the amount of 40% into the ceramic mass significantly increases technical performance at a temperature of 1350°C .

Keywords: acid resistance, acid-resistant tiles, chromite ore waste, non-enriched clay, chamotte

For citation: Abdrakhimov V.Z. Environmentally sound diagnostics on the use and impact of ferrous metallurgy waste on chemical resistance and phase composition of acid-resistant materials // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 45-57, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.4, EDN: CHKFGR

1. Введение

Металлургическое производство (черная и цветная металлургия) по степени ущерба для внешней среды занимает лидирующую позицию (2 место, после топливно-энергетического комплекса) [1]. Чёрная металлургия относится к энергоёмким отраслям: при переработке значительных объёмов минерального сырья лишь 35% превращается в готовую продукцию, а 65% отходов направляется в отвалы, создающие угрозу экологической безопасности [1–3]. В результате функционирования металлургических предприятий масштабные площади трансформируются в промышленные зоны, включающие урбанизированные территории и аграрные районы.

Современная металлургическая индустрия, в наибольшей степени в сегменте черной металлургии должна решать приоритетные вопросы в области повышения энергоэффективности, сокращения объёмов отходов, сведения к минимуму их негативного воздействия на окружающую среду и повышать экологическую безопасность [4–6].

Ключевую роль в процессе долгосрочного и устойчивого развития можно осуществить только с учетом эколого-экономических и хозяйственных аспектов [6, 7]. Использование отходов черной металлургии в производстве керамических материалов позволит сократить деградацию окружающей среды и ограничить их негативное воздействие на природные ресурсы [7-9].

Ограничение объемов выбросов вредных соединений, минимизация образования промышленных побочных продуктов, а также вторичная переработка отходов, соответствующая мировым тенденциям устойчивого вовлечения отходов в товары массового потребления, будут способствовать повышению экологической безопасности [3, 4, 10]. В частности, исследования [3, 6, 11] показывают, что использования отходов черной металлургии в производстве керамических материалов способствуют успешной реализации замкнутого цикла переработки отходов.

Производственная ресурсная эффективность обычно достигается путем применения методов замкнутой экономической системы [12]. В экономике замкнутого типа акцент смещается на переработку отходов в ресурсы, поэтому она полностью противопоставлена традиционной линейной экономике [13-15]. Экономика циркулярного типа делает упор на рециклинг отходов, многократном их использовании и замкнутых логистических схемах.

Поэтому необходимо сокращать масштабы образовавшихся отходов за счет использования их в керамических материалах, что позволит рационально использовать природные ресурсы и продлить срок службы продукции, например кислотоупоров посредством повышения кислотостойкости.

Для наиболее многочисленной группы неорганических кислотоупорных изделий, к которой относится кислотостойкая керамика, химическая устойчивость является одной из первостепенных характеристик защиты от агрессивного воздействия [16-18], в частности от проникновения в керамику агрессивных сред — жидкостей, газов и иных веществ, способных вызвать разрушение как самих изделий, так и близлежащих объектов [19-21].

В настоящей работе проведены исследования по использованию в производстве керамических кислотоупоров отхода черной металлургии, содержащего повышенное количество огнеупорных оксидов: магнезия ($MgO > 35\%$), хрома ($Cr_2O_3 > 25\%$), которые способствуют росту кислотостойкости в изделиях.

Накопленный объем научных работ, посвященных анализу кислотостойкости керамических кислотоупоров, пока не позволяет в достаточной степени описать и систематизировать механизмы, способствующие повышению данного показателя.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию кислотостойкости керамических кислотоупоров, на текущий момент не проведен достаточный объем работ по механизму повышения этого показателя [16-18]. Химическая стойкость — это одна из базовых характеристик кислотоупорных материалов, которая исключает риск проникновения в них разрушительных агрессивных, газов, жидкостей и материалов [1, 4, 17].

Поэтому целью является: исследовать влияние шламовых хвостов обогащения хромовых руд, содержащих повышенное количество огнеупорных оксидов магнезия и хрома, на химическую стойкость и фазовый состав кислотоупоров а основе каолиновой глины.

Задачами исследования являются: комплексное изучение физико-химических и технологических характеристик шламовых хвостов обогащения хромовых руд как отощающего компонента и необогащенной огнеупорной глины; а также обоснование возможности получения на их основе кислотоупорной плитки с повышенными показателями кислотостойкости и физико-механических свойств.

2. Материалы и методы

Микроструктурный анализ и определение элементарного химического состава исследуемых сырьевых компонентов осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии на приборе JSM-6390A (JEOL, Япония).

Изучение минералогического состава исходных сырьевых компонентов выполнялось с применением петрографического метода. В рамках исследования были

задействованы аншлифы, шлифы, иммерсионные жидкости и микроскопы моделей МИН-7 и Nu-2E.

Определение устойчивости кислотоупоров к кислотному воздействию осуществлялось согласно ГОСТ 473.1-2023 — межгосударственный стандарт «Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кислотостойкости», ГОСТ 4204 Реактивы. «Кислота серная. Технические условия» и работ [21-24] порошковым методом: когда образец раздробленного материала массой $1 \cdot 10^{-3}$ кг с размером частиц в диапазоне $D=0,5 - 1 \cdot 10^{-3}$ м подвергался обработке кипящей концентрированной серной кислотой в течение часа.

Прокипяченные раздробленные зерна очищались от кислоты с помощью фильтрации, далее осуществлялось удаление остаточных кислот методом подсушивания, после чего образец подвергался термической обработке. Кислотостойкость оценивалась путем соотношения массы образца после термообработки к его исходной массе, а полученный результат выражался в процентах. Фазовый состав образцов из оптимального состава определялся с привлечением ИК – спектров поглощения на спектрофотометре “Spekord-75JR”.

Для изготовления керамических кислотоупоров с высокими показателями использовались: связующим компонентом каолиновая глина месторождения «Союзное» [25], в качестве отощителя – шамот, изготовленный из каолиновой глины при обжиге 1200°C и хвосты обогащения хромитовых руд, подвергнутые прокаливанию при 800°C [26].

Данные по химическому составу (усредненный оксидный и поэлементный) приведены в табл. 1 и 2 табл. 2, по фракционному составу – в табл. 3. Электронное фото представлено на рис. 1, а минералогический состав – на рис. 2.

Таблица 1

Усредненный оксидный химический состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	$\Delta m_{\text{пр}}$
1. Каолининовая глина	51,11	32,22	0,52	0,22	0,17	—	2,06	7,09
2. Шамот	53,21	33,38	0,70	0,28	0,25	—	2,18	—
3. Шламовые «хвосты» обогащения	11,12	5,10	9,30	1,03	37,38	28,5	0,17	7,4
4. Прокаленные шламовые «хвосты» обогащения	12,40	5,68	10,31	1,5	39,15	31,32	0,20	—

Примечание: $\Delta m_{\text{пр}}$ – потери при прокаливании; $R_2O=Na_2O+K_2O$

Таблица 2

Поэлементный химический состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание элементов, мас., %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cr	K	Ca	Fe
1. Шламовые «хвосты» обогащения	2,41	40,37	0,11	22,10	3,10	3,80	20,4	0,08	1,03	3,60
2. Каолининовая глина	3,20	44,34	0,11	0,19	18,50	32,42	—	0,25	0,11	0,98

Таблица 3

Фракционный состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
1. Каолининовая глина	5,90	21,8	28,9	23,9	19,5
2. Шламовые «хвосты» обогащения	6,5	14,4	22,8	25,5	30,8

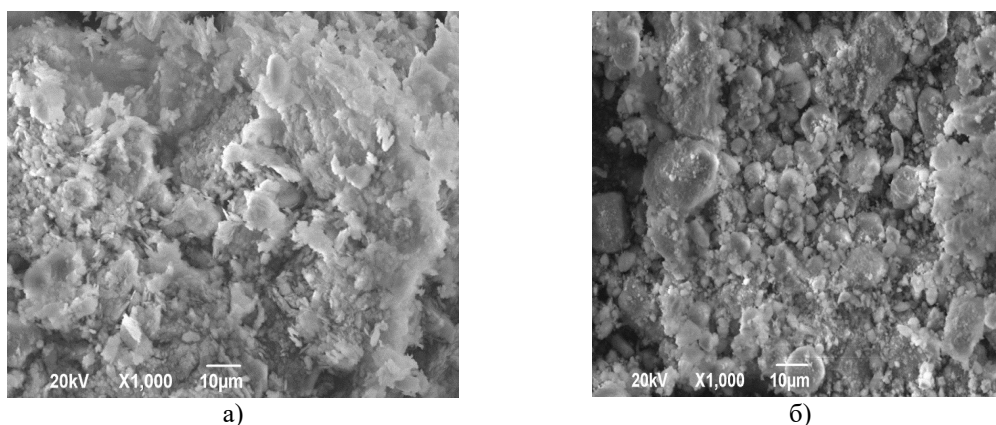


Рис. 1. Электронное фото сырьевых компонентов: а) каолиновая глина месторождения «Союзное»; б) прокаленные шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд. Увеличение а) и б) $\times 1000$ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Electron photo of raw materials: a) kaolinite clay from the Soyuznoye deposit; b) calcined slurry tailings from the processing of chromite ores. Magnification of a) and b) $\times 1000$ (illustration by the authors)

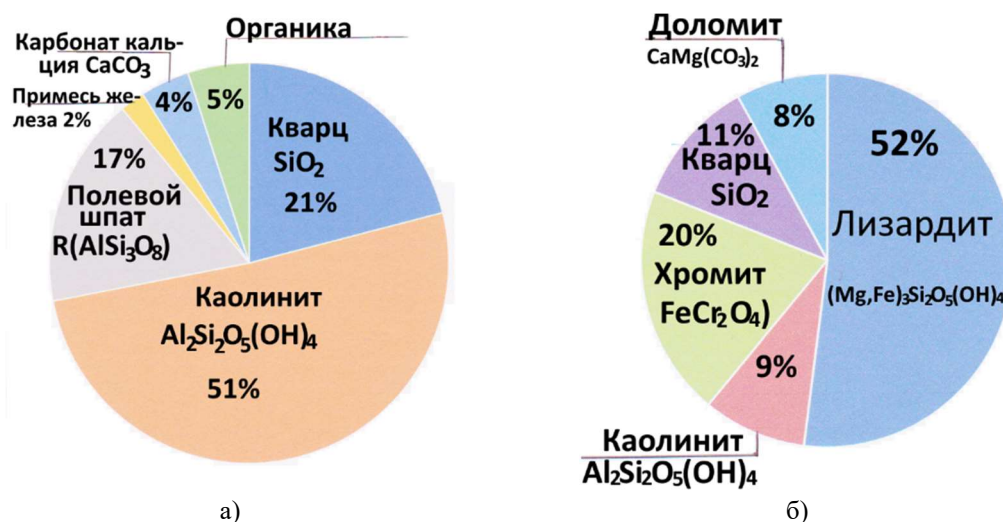


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых компонентов: а) каолиновая глина, б) шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Mineralogical composition of raw materials: a) kaolin clay, b) slurry tailings from chromite ore processing (illustration by the authors)

Каолиновая глина. Необогащенная глина месторождения «Союзное» (Актюбинская область) по огнеупорности ($1600-1650^\circ\text{C}$) - огнеупорная глина, по минералогическому составу – каолиновая. На рис. 1, а показана пластинчатая структура каолинита – ключевого минерала в составе исследуемого глинистого материала. Такой материал, где каолинит доминирует, принято называть каолином [25]. Исследуемая каолиновая глина является среднепластичной (число пластичности 15-18), грубодисперсная (табл. 3) и малочувствительная к сушке.

Шамот был синтезирован при термообработке 1200°C каолинового сырья месторождения «Союзное». Шамотный материал применялся в изготовления кислотоустойчивых изделий в качестве отощителя. Из табл. табл. 1, что при обжиге 1200°C каолиновой глины шамот обогатился Al_2O_3 совсем незначительно – соответственно с 31,21 до 33,38%.

Шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд являются отходами производства Донского горно-обогатительного комбината филиала АО «ТНК Казхром» [26, 27]. Химический состав шламовых «хвостов» обогащения представлен в табл. 1, поэлементный в табл. 2, а, огнеупорность шламов $1720-1780^\circ\text{C}$. Рис. 1, б и табл. 3 показали, что шламовые «хвосты» не нуждаются в грубом измельчении (когда размер частиц более 5 мм).

В природе известно около 30 хромосодержащих минералов [26, 27], но однако промышленное значение имеет лишь несколько минералов из группы хромшпинелидов с общей формулой $(Mg, Fe)(Cr, Al, Fe)_2O_4$. Исследования, проведенные в работе [26], показали, что в твердой фазе шпинелиды из оксидов образуются при температурах свыше 600°C с довольно большой скоростью поэтому шламовые «хвосты» обогащения предварительно обжигали во вращающееся печи (рис. 3) при температуре 800°C (до исчезновения органики, $\Delta m_{\text{пр}}$ (п.п.п., табл. 1). В табл. 4 приведены свойства кристаллических фаз (минералов), входящих в прокаленные шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд. Кроме того, процесс обогащения при обжиге 800°C менее энергозатратный, чем обжиг каолиновой глины на шамот при температуре 1200°C .

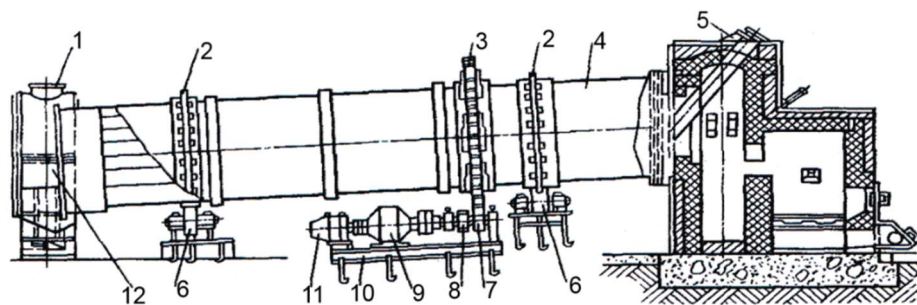


Рис. 3. Вращающаяся печь: 1 – патрубок; 2 – бандаж; 3 – венцовая шестерня; 4 – сварной стальной цилиндр; 5 – загрузочная течка; 6 – опорный ролик; 7 – подвенцовая шестерня; 8 – зубчатая пара; 9 – редуктор; 10 – сварная плита; 11 – электродвигатель; 12 – разгрузочная камера (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Rotating furnace: 1 - pipe; 2 - bandage; 3 - crown gear; 4 - welded steel cylinder; 5 - loading chute; 6 - support roller; 7 - sub-crown gear; 8 - gear pair; 9 - gearbox; 10 - welded plate; 11 - electric motor; 12 - unloading chamber (illustration by the authors)

Таблица 4

Свойства кристаллических фаз (минералов), входящих в прокаленные шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд

Кристаллическая фаза (минерал)	Основное применение	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Плотность, г/см^3	Твёрдость по шкале Мооса	Микротвёрдость, кг/мм^2
Магнезиальная шпинель - MgAl_2O_4 ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	высокоогнеупорная и химически стойкая керамика	2135	4,05	7,5-8	1378-1505
Магнхромит MgCr_2O_4 .	для огнеупорных материалов и керамических красок.	2330	4,4-4,43	6	1050-1130
Хромит (FeCr_2O_4).	огнезащита металлоконструкций	2180	4,5-4,8	6-7,5	1278-1456
Форстерит Mg_2SiO_4 .	Форстерит-сырье для производства огнеупоров	1810	3,3-3,5	7	1200-1250

На основе составов, представленных в табл. 5, готовили формовочную массу (композиция) при влажности 22-24%, из которой методом формования изготавливали квадратные плитки (размером 100X100X20 мм). Далее образцы подвергались сушке до достижения остаточной влажности 5%, а затем проводился обжиг при двух температурных режимов: 1300 и 1350°C . В табл. 6 представлены данные по химическому составу, использованных керамических композиций.

Следует отметить, что инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) позволяет определить фазовый состав керамических материалов. Метод основан на способности молекул взаимодействовать с инфракрасным светом, и анализируя полученные спектры, можно определить функциональные группы, присутствующие в материале. Это помогает оценить состояние кристаллических фаз и структуру керамического состояния [28-30].

Таблица 5

Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
1. Каолинистая глина	100	60	60
2. Шамот из обожженной каолинистой глины	—	40	—
3. Прокаленные шламовые «хвосты» обогащения хромитовых руд	—	—	40

Таблица 6

Химические составы составов (композиций) №2-3

Составы керамических масс (шихт)	Массовое содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O
Состав №2	61,85	33,98	0,72	0,42	0,28	—	2,75
Состав №3	40,97	21,17	4,88	0,93	15,92	13,41	2,12

3. Результаты и обсуждение

Результаты исследований демонстрируют, что при обжиге кислотоупорных плиток из каолиновой необогащенной глины, без применения отошителей не представляется возможным сформировать изделия в диапазоне температур 1300-1350°C соответствующие стандартам ГОСТа (табл. 7). Введение в керамические композиции оптимального количества шамота (40%) обеспечит получение кислотоупорных плиток, соответствующих нормативам ГОСТа, однако при температуре обжига не ниже 1350°C (табл. 7). Содержание отошителя на уровне 40% принято за оптимальное, поскольку оно обеспечивает снижение числа пластичности керамической массы с 16 до 9 (табл. 7). При значениях числа пластичности ниже 9 связующая способность глины оказывается недостаточной, что вызывает появление трещин на изделиях в процессе формования (дефицит связующих качеств у глины).

Таблица 7

Технические показатели кислотоупорных плиток

Показатели	Составы			ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные».
	1	2	3	
Керамическая масса				
Пластичность шихты	16	9	9	—
Огнеупорность, °С	1650	1650	1720	—
Температура обжига 1300°С				
1. Водопоглощение, %	5,3	4,8	5,1	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	96,4	97,8	98,4	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	48,2	52,4	54,8	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	24,8	26,2	30,4	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	32	43	48	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	4	6	8	Не менее 5
Температура обжига 1350°С				
1. Водопоглощение, %	4,2	3,8	3,7	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	97,8	98,4	99,2	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	55,2	61,2	70,5	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	32,3	34,5	41,4	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	42	52	61	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	6	8	9	Не менее 5
Пористость, %				
открытая	7,19	6,53	5,78	—
закрытая	2,86	3,34	3,14	
общая	10,05	9,87	8,92	

Внедрение в состав керамической композиции прокаленных шламовых отходов, образующихся при обогащении хромитовых руд, в количестве 40% обеспечивает существенное повышение технических показателей кислотоупоров при температуре 1350°C (табл. 7) [1, 3, 31].

Взаимосвязь кислотостойкости образцов из композиций №1-3 с температурой обжига 1000 – 1350°C представлена на рис. 4, где 1000°C – это температура начала образования жидкой фазы, а 1350°C – конечная температура обжига. Кислотостойкость образцов из композиций №1-3, обожженных при температуре 1350°C, при различной концентрации серной кислоты и времени кипячения, представлена в табл. 8. На рис. 5 представлены ИК-спектры образцов из составов №1-3, обожженных при температуре 1350°C.

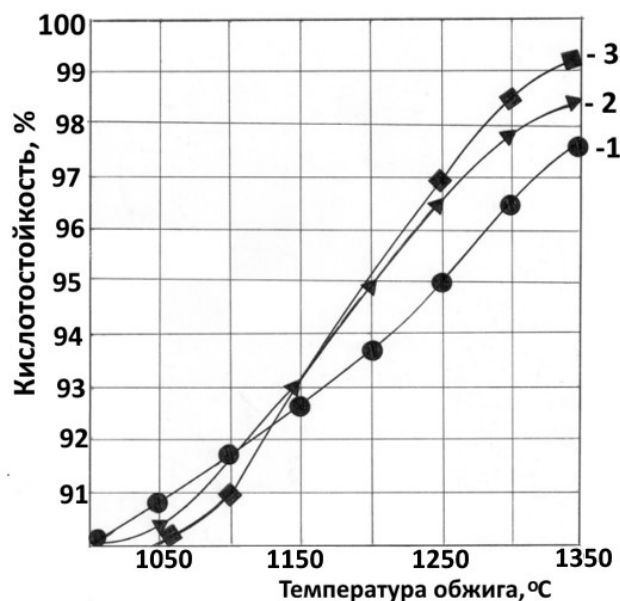


Рис. 4. Зависимость кислотостойкости от температуры обжига образцов из композиций №: 1, 2, 3 (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Dependence of acid resistance on the firing temperature of samples from compositions No. 1, 2, and 3 (illustration by the authors)

Таблица 8

Кислотостойкость исследуемых проб								
Композиция	Концентрация серной кислоты (H ₂ SO ₄), %							
	5		40			70		
	При времени кипячения, в ч							
	11	28	1	12	28	1	12	28
№1	97,1	96,4	96%	94,8	94,2	92,1	90,2	87,4
№2	98,8	98,3	97,9	96,8	96,3	95,3	94,8	90,0
№3	99,5	98,6	98,2	97,2	96,7	95,8	95,3	91,2

Самый быстрый рост кислотостойкости проявляется отчетливо в диапазоне температур 1000-1250°C у кислотоупорных плиток состава №3 (с 90 до 97%, рис. 4), при сопоставлении с плитками составов №1 и №2. В противовес к плиткам из состава №3, образцы (кислотоупорные плитки) из составов (композиций) №1 и №2 отличаются высоким содержанием пористости, особенно открытой, в которые может проникнуть кислота, например серная кислота (табл. 7).

Образцы из композиции №3 помимо невысокого содержания открытых пор 5,78% (табл. 7) содержат высокоогнеупорные минералы (высокоогнеупорные соединения способные противостоять действию высоких температур от 1770 до 2000 °C): магнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$, огнеупорность 2135°C), форстерит (Mg_2SiO_4 , огнеупорность 1810°C), хромит ($FeCr_2O_4$, огнеупорность 2180°C), магнохромит ($MgCr_2O_4$,

огнеупорность 2330°C), которые повышают не только кислотостойкость, но и огнеупорность (табл. 4, рис. 5).

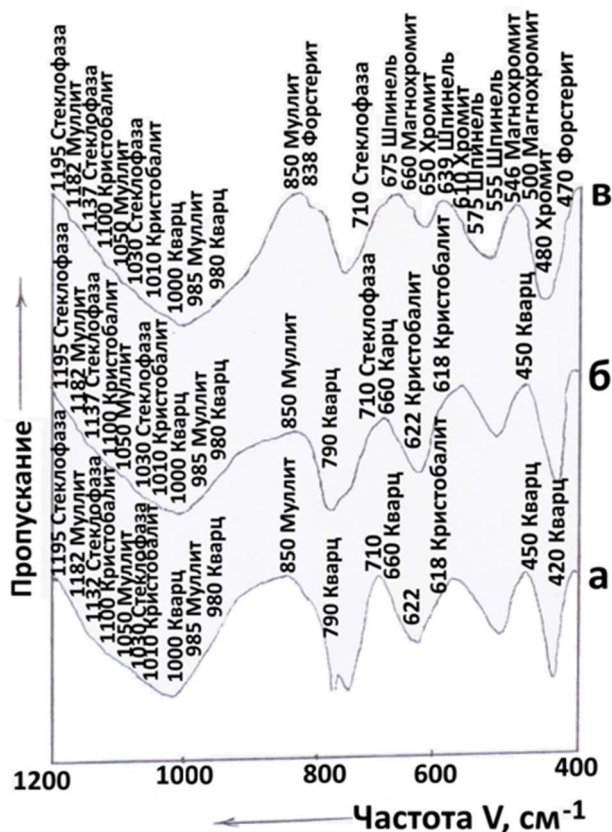


Рис. 5. ИК-Спектры образцов составов №1-3. а) состав №1; б) состав №2; в) состав №3
(иллюстрация авторов)

Fig. 5. IR spectra of samples of compositions No. 1-3 а) composition No. 1; б) composition No. 2; в) composition No. 3 (illustration by the authors)

Из табл. 8 следует, что самому сильному разрушению подвергаются образцы из композиций, содержащих повышенные количества открытых пор, в которые может проникнуть серная кислота. А образцы из композиции №3 имеют высокие показатели по кислотостойкости, благодаря низкому содержанию открытых пор (5,78%, табл. 7), и содержанию высокоогнеупорных соединений: магнезиальная шпинель, форстерит, хромит и магнохромит, которые способствуют повышению кислотостойкости (табл. 4, рис. 5), как и в работах [1, 17, 20].

4. Заключение

1. Исследования показали, что из каолиновой необогащённой глины не представляется возможным получение в диапазоне температур 1300-1350°C соответствующие стандартам кислотоупорные плитки.

2. Установлено, что введение в керамическую массу прокаленных шламовых «хвостов» обогащения хромитовых руд в количестве 40% значительно повышают технические показатели при температуре 1350°C

3. Выявлено, что самый быстрый рост кислотостойкости проявляется отчетливо в диапазоне температур 1000-1250°C у кислотоупорных плиток состава, содержащего шламовые хвосты обогащения (состав №3) с 90 до 97% рис. 4). В противовес к плиткам из состава №3, образцы из составов №1 и №2 отличаются высоким содержанием пористости, особенно открытой, в которые может проникать серная кислота (табл. 7).

4. Исследования показали, что образцы из состава №3 помимо невысокого содержания открытых пор 5,78% (табл. 7) содержат высокоогнеупорные минералы, которые способны противостоять действию высоких температур от 1770 до 2000 °C и повышать кислотостойкость: магнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$, огнеупорность 2135°C),

форстерит (Mg_2SiO_4 , огнеупорность 1810°C), хромит (FeCr_2O_4 , огнеупорность 2180°C), магнохромит (MgCr_2O_4 , огнеупорность 2330°C) (табл. 4, рис. 5).

Список литературы/References

1. 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. №2 С. 76–85. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85>
Abdrakhimova E.S. New technologies and compositions for recycling non-ferrous metallurgy waste into the production of acid-resistant materials without the use of traditional natural raw materials. // News of universities. Non-ferrous metallurgy. 2025. No. 2, P. 76–85. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85>
2. Абдрахимов В.З., Сафронов Е.Г., Нарыжная Н.Ю., Силинская С.М. Рециклинг отходов металлургии в производстве кислотоупоров способствует экологии, экономики и расширяет границы землеустройства и кадастров // Экологические системы и приборы. 2025. №12. С. 3-12. DOI: 10.25791/esip.12.2025.1560
Abdrakhimov V.Z., Safronov E.G., Naryzhnaya N.Yu., Silinskaya S.M. Recycling of metallurgical waste in the production of acid-resistant materials contributes to the environment, economy, and expands the boundaries of land management and cadastres // Environmental Systems and Devices. 2025. No. 12. P. 3-12. DOI: 10.25791/esip.12.2025.1560
3. Абдрахимов В.З. Рециклинг отходов металлургии в производстве кислотоупоров без применения традиционного природного сырья // Региональная архитектура и строительство. 2024. №4. С. 54-62. DOI: 10.54734/20722958_2024_4_54
Abdrakhimov V.Z. Recycling of metallurgical waste in the production of acid-resistant materials without the use of traditional natural raw materials // Regional Architecture and Construction. 2024. No. 4. P. 54-62. DOI: 10.54734/20722958_2024_4_54
4. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov, V.Z., Abdrakhimova, E.S. Study of the Influence of Nanotechnogenic Raw Materials and Pyrophyllite on the Orientation of Clay Particles and the Water Permeability of Acid-Resistant Materials // Glass and Ceramics. 2021;77(9, 110): P. 348–354. DOI: 10.1007/s10717-021-00305-z
5. Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Башенко Л.П., Загуляев Д.В. Уменьшение количества отходов и внедрение экологически безопасных и эффективных производственных процессов при использовании высококремнистых сплавов системы Al – Si. // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2025. №3. С. 239-247. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-239-247>.
Shlyarov V.V., Shlyarova Yu.A., Bashchenko L.P., Zagulyaev D.V. Waste reduction and implementation of environmentally safe and efficient production processes using high-silicon alloys of the Al – Si system. // News of universities. Ferrous metallurgy. 2025. No. 3. P. 239-247. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-239-247>
6. Gusakova O.V., Shepelevich V.G. Microstructure and coefficient of friction of silumins obtained by rapid solidification // Journal of Friction and Wear. 2024. №2. P. 66-71. <https://doi.org/10.3103/s1068366624700107>
7. Farkoosh A.R., Grant Chen X., Pekguleryuz M. Dispersoid strengthening of a high temperature Al-Si-Cu-Mg alloy via Mo addition. Materials Science and Engineering: A. 2015; 620:181-189. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.004>
8. Hirsch S.J., Grund T., Lampke T. Towards closed-loop recycling of ceramic particle-reinforced aluminium alloys: Comparative study of resistance-heating sintered primary and solid-state recycled secondary SiCp/AlSi7Mg composites. Crystals. 2023;13(5):830. <https://doi.org/10.3390/cryst13050830>
9. Матевосова К.Л., Грязнова В.А., Чазов Т.К. Экологические проблемы и устойчивое развитие алюминиевой промышленности // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2019. №2. С. 1-17. DOI: 10.15862/11ECOR219
Matevosova K.L., Gryaznova V.A., Chazov T.K. Environmental Problems and Sustainable Development of the Aluminum Industry. // Internet Journal "Waste and Resources". 2019. No. 2. P. 1-17. DOI: 10.15862/11ECOR219

10. Ульева Г.А., Туысхан К., Мацугина Е.М., Волокитина И.Е., Ахметова Г.Е. Современное состояние проблемы утилизации отходов производства. // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2025. №2. С. 131-138. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-131-138>
Ulyeva G.A., Tuyskhan K., Matsugina E.M., Volokitina I.E., Akhmetova G.E. Actual progress of production waste disposal problems. // News off universities. Ferrous Metallurgy. 2025. No. 2. P. 131-138. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-131-138>
11. Wang S., Zhou P., Liu X., Zhang S., Jia Q. Effect of modified coal tar pitch addition on the microstructure and properties of Al₂O₃-SiC-C castables for solid waste incinerators. // *Ceramics International*. 2022. No. 14. P. 20778-20790. DDI:10.1016/j.ceramint2022.04.060
12. Мележигов Д. Е. Платонов А. М. Экономика замкнутого цикла – комплексный подход к проектированию, производству и утилизации продуктов. // Сборник докладов международной конференции студентов и молодых ученых. Умный регион: устойчивое развитие в цифровой экономике. Екатеринбург. 2023. С. 909-912.
Melezhikov D. E. Platonov A. M. The closed-loop economy is a comprehensive approach to the design, production, and recycling of products. // Collection of reports of the international conference of students and young scientists. Smart region: sustainable development in the digital economy. Yekaterinburg. 2023. P. 909-912.
13. Диденко Н. И., Рыбас А. Л., Конахина Н. А., Киккас К. Н., Методологический подход к формированию циркулярной экономики на территории муниципального района. Часть 1 // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 1. С. 1-17. — URL: <https://esj.today/PDF/64ECVN124.pdf>
Didenko N. I., Rybas A. L., Konakhina N. A., Kikkas K. N., Methodological Approach to the Formation of a Circular Economy in a Municipal District. Part 1 // Bulletin of Eurasian Science. 2024. Vol. 16. No. 1. P. 1-17. — URL: <https://esj.today/PDF/64ECVN124.pdf>
14. Mostaghel R., Oghazi P., Lisboa A. The transformative impact of the circular economy on marketing theory. // *Technological Forecasting and Social Change*. 2023. Vol. 195. P. 122780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technote.2023.122780> — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162523004651?via%3Dihub>
15. Джандарова Л.Х. Применение бизнес-моделей циркулярной экономики в сельском хозяйстве // Журнал прикладных исследований. 2022. № 12. С. 57–61. DOI: https://doi.org/10.47576/2712-7516_2022_12_57 — URL: <https://elibrary.ru/pdpewl> EDN: PDPEWL
Jandarova L.Kh. Application of Circular Economy Business Models in Agriculture // *Journal of Applied Research*. 2022. No. 12. P. 57–61. DOI: https://doi.org/10.47576/2712-7516_2022_12_57 — URL: <https://elibrary.ru/pdpewl> EDN: PDPEWL
16. Макарова И.А., Либеровская С.В. Кислотостойкие и теплоизоляционные керамические материалы на основе микрокремнезема. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. №4. С. 742-753. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-742-753>
Makarova IA, Liberovskaya SV. Acid-resistant and heat-insulating ceramic materials based on silica fume. News of universities. Investments. Construction. Real estate. 2019. Vol.9. №4. P. 742-753. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-742-753>
17. Мягкова Е.С., Тлехусеж М.А. Химическая и радиационная стойкость керамики // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 4. С. 77-79; URL: <https://science-pedagogy.ru/article/view?id=2148> дата обращения: 17.09.2026).
Myagkova E.S., Tlekhusezh M.A. Chemical and radiation resistance of ceramics // Scientific review. Pedagogical sciences. 2019. No. 4. P. 77-79; URL: <https://science-pedagogy.ru/article/view?id=2148> date of request: 09/17/2026).

18. Женжурист И.А., Хозин В.Г., Низамов Р.К. Использование промышленных отходов стеклоизделий в технологии строительной керамики // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-34-36>
Zhenzhurist I.A., Khozin V.G., Nizamov R.K. Use of industrial waste from glass products in the technology of building ceramics // Building Materials. 2019. No. 12. P. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-34-36>
19. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние шлака от производства металлического хрома на технические показатели кислотоупорных плиток // Construction and Geotechnics. - 2020. - Т. 12, № 4. - С. 94-102. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.07
Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The effect of slag from the production of metallic chromium on the technical characteristics of acid-resistant tiles. Construction and Geotechnics. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 94-102. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.07
20. Акимочкина Г.В. Роговенко Е.С., Фоменко Е.В. Определение сопротивления раздавливанию и кислотостойкости узких фракций микросфер летучих зол как основы композитных материалов // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2020. Т. 13. №2. С. 189-200. DOI: 10.17516/1998-2836-0174.
Akimochkina G.V., Rogovenko E.S., Fomenko E.V. Determination of the Crush Resistance and Acid Resistance of Narrow Fractions of Fly Ash Microspheres as the Basis for Composite Materials // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 189-200. DOI: 10.17516/1998-2836-0174.
21. Adinaev Kh.A., Mukhamedbayeva Z.A., Mukhamedbaev A.A. Physico-mechanical and chemical studies of diabase and basalt acid-resistant compositions in aggressive media // Universum: technical sciences: electron. Scientific journal. 2018. No. 3. P. 42-45. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/5639>.
22. Родина Т.И. Исследование влияния серной кислоты на химическую стойкость кислотоупорных изделий, изготовленных из глин с различным содержанием железистых примесей. // Тр. ин-та НИИСтройкерамики. 1977. №33. С. 103-112.
Rodina T.I. Investigation of the effect of sulfuric acid on the chemical resistance of acid-resistant products made from clays with various ferruginous impurities. // Works of the Institute of Engineering Ceramics. 1977. No. 33. P. 103-112.
23. Абдрахимова Е.С. Влияние пиррофиллита на химическую стойкость кислотоупоров // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2000. №7. С. 46-49.
Abdrakhimova E.S. The effect of pyrophyllite on the chemical resistance of acid-resistant materials. // News of universities. Construction. 2000. No7. P. 46-49.
24. Заверзина Е.И., Родина Т.И., Зайонц Р.М. Сравнение методик определения кислотостойкости кислотоупорных изделий. Тр. ин-та НИИСтройкерамики. 1973. №38. С. 84-88.
Zaverzina E.I., Rodina T.I., Zayonts R.M. Comparison of methods for determining the acid resistance of acid-resistant products. // Works of the Institute of Engineering Ceramics. 1973. No. 38. P. 84-88.
25. Курбанбаев М.Е., Есимов Б.О., Адырбаев Т.А. Каолины месторождения «Союзное» как потенциальное сырье для производства электротехнического фарфора // Фундаментальные исследования. 2015. №4. С.17-19.
Kurbanbayev M.E., Esimov B.O., Adyrbayev T.A. Kaolins of the “Soyuznoye” deposit as a potential raw material for the production of electrical porcelain // Fundamental Research. 2015. No.4. P. 17-19.
26. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Western Kazakhstan Raw Materials for Producing Acid-Resistant Materials // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. No. 6. P. 642–648. DOI: 10.1007/s11148-023-00784-3.
27. Гладышев С. В., Абдулвалиев Р. А., Кенжалиев Б. К., Дюсенова С. Б., Имангалиева Л. М. Получение хромитового концентрата из хвостов обогащения // Комплексное использование минерального сырья. 2018. №1. С. 12–17.

- Gladyshev S. V., Abdulvaliev R. A., Kenzhaliev B. K., Dyusenova S. B., Imangalieva L. M. Production of chromium concentrate from tailings. 2018 No.1. P. 12–17.
28. Ковков И.В., Абдрахимова В.З., Абдрахимов В.З. Исследование ИК-спектроскопическим методом фазового состава керамических материалов // Химия и химическая технология. 2007. №5. С. 114–117.
Kovkov I.V., Abdrakhimova V.Z., Abdrakhimov V.Z. Study of the Phase Composition of Ceramic Materials by IR Spectroscopy // Chemistry and Chemical Technology. 2007. No. 5. P. 114–117.
29. Mavlyuberdinov A.R., Gaynutdinov I.Kh., Evstigneeva Yu.V. To issue of studying mechanism of increasing strength of porous ceramic crock. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Art. 022032.DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022032
30. Ибрагимов Р., Королёв Е. Фазовый состав продуктов гидратации портландцемента, механоактивированного в аппарате вихревого слоя с добавками различной природы. // Academia. Архитектура и строительство. 2023. №4. С 138–144. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-4-138-144>
Ibragimov R., Korolev E. Phase composition of the hydration products of Portland cement mechanically activated in a vortex layer apparatus with additives of various origins. // Academia. Architecture and Construction. 2023. No. 4. P.138–144. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-4-138-144>
31. Вдовин Е.А., Коновалов Н.В., Гильметдинов Р.И. Применение отходов металлургического производства для укрепления грунтов дорожного назначения // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK. 2021: Сборник материалов. Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2021. С. 56–61
Vdovin E.A., Konovalov N.V., Gilmutdinov R.I. The use of metallurgical production waste for strengthening road soil // International Forum KAZAN DIGITAL WEEK. 2021: Collection of materials. Kazan: State Budgetary Institution “NCZHD”, 2021. P. 56–61.

Информация об авторе

Абдрахимов Владимир Закирович, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: 3375892@mail.ru, ORCID - ORCID 0000-0002-1832-2572

Information about the author

Vladimir Z. Abdrakhimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara State University of Economics.
Email: 3375892@mail.ru, ORCID - ORCID 0000-0002-1832-2572

Дата поступления: 20.04.2026

Дата принятия: 30.09.2026