

УДК: 666.774.017.532
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.8
EDN: EBLYEO



Влияние феррохромового алюминотермического шлака на химическую стойкость кислотоупорных плиток

В.З. Абдрахимов¹, Е.Г. Сафронов²

¹Самарский государственный экономический университет,

²Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Истощение естественных глинозем-силикатных сырьевых материалов, применяемых в производстве кислотоупоров, вызвало необходимость заменить природное сырьё на крупные отходы заводов, которые своими огромными накоплениями в России наносят ещё и огромный вред экологии. Поэтому целью исследования является анализ влияния феррохромового алюминотермического шлака на химическую стойкость кислотоупоров, полученных на основе глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд.

Задачи исследования: определить основные параметры феррохромового алюминотермического шлака как отощителя и глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд как тугоплавкой глинистой составляющей для получения кислотоупорной плитки с повышенной кислотостойкостью; рассмотреть возможность возврата в оборот техногенные отходы металлургии и предложить на их основе научно-обоснованные составы для кислотоупоров; проанализировать результат воздействия феррохромового алюминотермического шлака, содержащего повышенную концентрацию оксида алюминия ($Al_2O_3 > 50\%$) на кислотоустойчивость керамической плитки.

Результаты. Анализы исследования показали, что самому сильному разрушению подвергаются образцы из композиций, содержащих повышенные количества оксидов железа (соответственно Fe_2O_3 -6,74 и 6,98%) и открытых пор (7,19 и 6,53%), в которые может затекать серная кислота, поэтому и кислотостойкость у плиток этих составов соответственно равны 97,8 и 98,05. А образцы из композиции, в которых в качестве отощителя используется феррохромовый алюминотермический шлак, содержащий повышенное количество алюминия ($Al_2O_3 > 50\%$), помимо невысоких содержаний оксидов железа (Fe_2O_3 -3,87%) и открытых пор (5,05%), еще и содержит высокоогнеупорные минералы (огнеупорность превышает 2000°C), которые значительно повышают не только огнеупорность, но и кислотостойкость.

Выводы. Установлено, что при температуре обжига 1300°C анализируемые плитки, в состав которых не входит феррохромовый алюминотермический шлак, отличаются высоким содержанием оксидов железа и открытых пор, поэтому кислотостойкость этих образцов не превышает 98%. Введение в композиции шлака повышает кислотостойкость до 99,2%, что расширяет возможности применения таких плиток в строительстве.

Ключевые слова: кислотостойкость, кислотоупорная плитка, феррохромовый алюминотермический шлак, глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд (ГЦИ), шамот

Для цитирования: Абдрахимов В.З., Сафронов Е.Г. Влияние феррохромового алюминотермического шлака на химическую стойкость кислотоупорных плиток // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 89-98, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.8, EDN: EBLYEO

Influence of ferrochrome aluminothermic slag on the chemical resistance of acid-resistant tiles

V.Z. Abdrakhimov¹, E.G. Safronov²

¹Samara State University of Economics,

²Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The exhaustion of natural alumina-silicate raw materials for the production of acid-resistant materials has necessitated the substitution of natural raw materials to large-tonnage industrial waste, which, with their enormous accumulations in the Russian Federation, also cause catastrophic damage to environmental systems. That's why *the purpose of the work is* to analyze the influence of ferrochrome aluminothermic slag on the chemical resistance of acid-resistant materials obtained on the basis of the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores. The tasks of the study are as follows: to specify the key parameters of ferrochrome aluminothermic slag as a leaner and the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores as a refractory clay component for the production of acid-resistant tiles with increased acid resistance; to consider the possibility of the return of man-made metallurgy raw materials into exploitation and recommend well-reasoned scientifically proven composition based on them for acid-resistant materials; to analyze the effect of ferrochrome aluminothermic slag containing an increased concentration of aluminum oxide ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 50\%$) on the acid resistance of ceramic tiles.

Results. The analysis of the study showed that samples (acid-resistant tiles) from compositions containing increased amounts of iron oxides (Fe_2O_3 - 6,74 and 6,98%, respectively) and open pores (7,19 and 6,53%), into which sulfuric acid can flow, are most severely damaged, therefore, the acid resistance of tiles of these compositions are 97,8 and 98,05, respectively. And samples from the composition, which use ferrochrome aluminothermic slag containing an increased amount of aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 50\%$) as a leaner, in addition to low concentrations of iron oxides (Fe_2O_3 - 3,87%) and open pores (5,05%), also contain highly refractory minerals (fire resistance exceeds 2000°C), which significantly increase not only fire resistance, but also acid resistance.

Conclusions. It was found that at a firing temperature of 1300 ° C, the analyzed tiles of compositions that do not contain ferrochrome aluminothermic slag are characterized by a high content of iron oxides and open pores, therefore, the acid resistance of these samples does not exceed 98%. The introduction of slag into the composition increases the acid resistance to 99,2%.

Keywords: acid resistance, acid-resistant tiles, ferrochrome aluminothermic slag, clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores, chamotte

For citation: Abdrakhimov V.Z., Safronov E.G. The Effect of ferrochrome aluminothermic Slag on the Chemical Resistance of Acid-resistant Tiles // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 89-98, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.8, EDN: EBLYEO

1. Введение

Несмотря на большое количество работ по изучению кислотостойкости керамических кислотоупоров, механизм повышения этого показателя до сих пор изучен недостаточно [1-3]. Химическая стойкость – это одна из ключевых характеристик кислотоупорных материалов, которая предотвращает опасность проникновения в них разрушительных агрессивных газов, жидкостей и материалов [2-4].

Кислотоупорные керамические материалы должны оказывать сопротивление особенно воздействию жидким коррозионным средам. Кислотоупоры применяют для инженерных коммуникаций полов, монтажа газоходов, для инфраструктуры трубопроводов и вентиляции каналов, обкладки и защиты емкостей оборудования, особенно в химических производствах. Поэтому керамическая отрасль производит изделия, устойчивые к кислотам, в виде кирпичей, плиток, труб различных диаметров и конфигураций, фасонов, профилей и специальных изделий, включая и декоративные [5-7].

Спрос на кислотоупорные изделия заметно набирает обороты, рынок кислотоупорной продукции расширяется особенно в химической промышленности и переработке нефти, где создаются современные способы футеровки газо- и нефтепроводов [8-10]. Поэтому нужно, оценить и применять высококачественные алюмосодержащие сырьевые ресурсы для повышения основных показателей изделий. Синтез ультрасовременных технологических наработок в химических, металлургических и нефтехимических промышленности позволит реализовать наращивание экономического потенциала страны.

Запасы природных глинозём-силикатных материалов для производства кислотоупоров истощаются, что делает неизбежной замену природного сырья на крупнотоннажные промышленные отходы. Эти отходы накапливаются в России в колоссальных объёмах и причиняют серьёзный вред экосистемам.

Поэтому целью исследования является анализ влияния феррохромового алюминотермического шлака на химическую стойкость кислотоупоров, полученных на основе глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд.

Задачи исследования: определить основные параметры феррохромового алюминотермического шлака как отощителя и глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд как тугоплавкой глинистой составляющей для получения кислотоупорной плитки с повышенной кислотостойкостью; рассмотреть возможность возврата в оборот техногенные отходы металлургии и предложить обоснованные, научно подтверждённые составы на их основе для кислотоупоров; проанализировать результат воздействия феррохромового алюминотермического шлака, содержащего повышенную концентрацию оксида алюминия ($Al_2O_3 > 50\%$) на кислотоустойчивость керамической плитки.

Представленная статья это - продолжение работ [7, 10] по вовлечению техногенного сырья металлургии, в том числе содержащих повышенное количество оксида алюминия ($Al_2O_3 > 50\%$) в производство кислотоупорных плиток без использования натурального традиционного сырья.

2. Материалы и методы

Была проанализирована микроструктура и поэлементный состав отходов производств (техногенного сырья) с использованием микроскопом фирмы Jeol Япония - JSM 6390A, и минералогический состав с применением петрографии: аншлифов, шлифов, иммерсионных жидкостей и микроскопов МИН-7 и Nu-2E.

Химическая стойкость кислотоупоров определена с использованием ГОСТ 473.1-2023 — межгосударственный стандарт «Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кислотостойкости», ГОСТ 4204 Реактивы. «Кислота серная. Технические условия» и работ [11-13] порошковым методом: когда $1 \cdot 10^{-3}$ кг зерен раздробленного изделия до размера $D=0,5 - 1 \cdot 10^{-3}$ м в течение часа выдерживалось в концентрированной серной кислоте при кипячении.

Раздробленные зерна после кипячения очищались на фильтре от кислоты, а после удаления остатков кислоты методом подсушки подвергались термообработки. Кислотостойкость определена делением термообработанной массы невестки на ее первоначальную массу, полученное частное от деления обозначали в %.

ГЦИ осуществляла функции связующей тугоплавкой глины, а шамот, полученный в результате обжига из нее — в качестве отощителя для получения кислотоупора. В качестве высокоглиноземистого отощителя ($Al_2O_3 > 50\%$) использовался феррохромовый алюминотермический шлак. Химические составы отходов производств: оксидный и поэлементный представлены в табл. 1-2, фракционный состав исследуемых отходов производств в табл. 3, микроструктуры на рис. 1, а минеральные составы на рис. 2.

Таблица 1

Усредненный химический оксидный состав отходов производств

Отходы производств	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	П.п.п.
1. ГЦИ	59,59	22,43	6,74	1,28	1,54	—	1,58	7,04
2. Шамот из ГЦИ	61,88	25,18	7,58	1,54	1,89	—	1,93	—
3. Феррохромовый алю- минотермический шлак.	1,89	60,8	0,50	15,41	13,53	7,52	2,45	—

П.п.п. – потери при прокаливании; R₂O=Na₂O+K₂O

Таблица 2

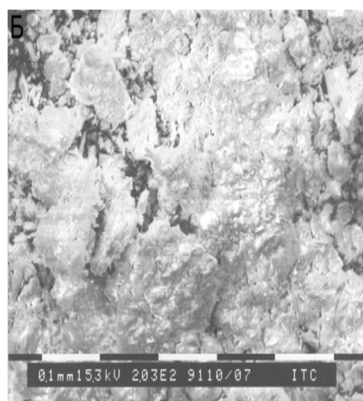
Поэлементный химический состав отходов производств

Отходы производств	Содержание элементов, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Cr
1. ГЦИ	2,18	51,26	0,26	0,54	15,45	24,8	0,32	0,32	4,87	—
2. Шамот из ГЦИ	—	48,76	0,31	0,71	17,18	27,14	0,35	0,22	5,18	—
3. Феррохромовый алюминотермический шлак.	-	49,3	0,9	7,4	29,4	0,7	0,6	8,4	0,7	3,6

Таблица 3

Фракционный состав исследуемых отходов производств

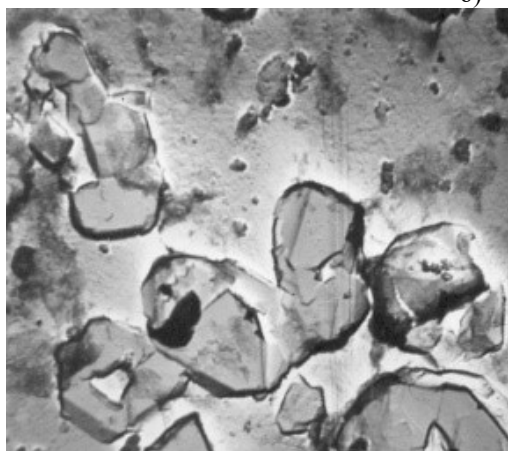
Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
ГЦИ	0,8	8,1	12,1	21,0	58
3. Феррохромовый алю- минотермический шлак.	10,83	25,43	25,52	12,85	25,37



а)



б)



в)

Рис. 1. Микроструктуры отходов производств: а) – ГЦИ; б) – шамот из ГЦИ; в) феррохромовый алюминотермический шлак. Увеличение: а) x1000; б) x10; в) x1000 (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Microstructures of industrial waste: a) – the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores; b) – the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores chamotte; c) Ferrochrome aluminothermic slag. Increase: a) x1000; b) x10; c) x1000 (illustration by the authors)

Для исследования химической стойкости кислотоупоров и других технических показателей использованы, аналогично работам [5, 7, 10], плитки марок КШ и ТКШ. В работах [10, 17] авторы предложили замещение кислотоупорного кирпича на плитки марок КШ и ТКШ, что позволило снизить расход сырья 2,5 раза, а массу футеровки почти в 3 раза.

Керамические образцы из составов 1-3 (табл. 4) получали, воспользовавшись процедурой экструзия, при которой подготовленные композиции подавались через специальный канал в виде прямоугольника и в дальнейшем нарезались по установленным параметрам размерам (плитки типа ПК-1 размером 100X100X20 мм), которые обезвоживали до конечной влажности 5% и термообрабатывали при 1250°C и 1300°C.

Таблица 4

Составы и показатели керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
1. ГЦИ	100	60	60
2. Шамот из обожженной ГЦИ	—	40	—
3. Феррохромовый алюминотермический шлак	—	—	40
Показатели керамической композиции и усадка высушенной плитки			
Пластичность композиции	22	11	11
Усадка высушенной плитки, %	6,8	4,8	4,8

В табл. 5 приведены химические оксидные составы композиций №2-3, а в табл. 6 технические показатели кислотоупорных плиток, обожженных при температурах 1250°C и 1300°C.

Таблица 5

Оксидные химические составы композиций №2-№3.

Составы керамических композиций	Массовое содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	П.п.п.
Состав №2	60,38	24,18	6,98	1,44	1,67	—	1,68	3,67
Состав №3	33,45	38,30	3,87	8,12	7,28	3,44	1,94	3,65

Таблица 6

Физико-механические показатели кислотоупорных плиток

Показатели	Составы			ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные» Марка КШ (кислотоупорные шамотные)
	1	2	3	
Температура обжига 1250°C				
1. Водопоглощение, %	3,8	3,6	3,4	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	96,5	97,7	98,2	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	57,2	60,1	63,5	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	32,4	34,3	37,4	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	42	47	57	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	4	6	8	Не менее 5
Температура обжига 1300°C				
1. Водопоглощение, %	2,3	2,2	1,8	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	97,8	98,0	99,2	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	63,8	69,4	73,3	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	38	42	48	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	58	69	75	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	6	9	11	Не менее 5
Пористость, %				
открытая	7,19	6,53	5,05	—
закрытая	2,86	3,82	4,98	
общая	10,05	10,35	10,03	

Согласно нормативной документации ГОСТ 28874 «Огнеупоры» алюмосиликатные огнеупоры по процентному содержанию Al_2O_3 , разделяют на три группы, мас. %: а) полукислые — от 14 до 28; б) шамотные — от 28 до 45; в) высокоглиноземистые — от 45 до 95. Как видно из табл. 1 и 4 составы №1 и 2 относятся к группе полукислые, а состав №3 — к шамотным. Полукислые композиции экономически целесообразно применять в противопожарной изоляции, поэтому такие огнеупоры и кислотоупоры имеет большие перспективы.

3. Результаты и обсуждение

ГЦИ образуется мокрогравитационным способом обогащения металлургической руды методом отделения ее от тугоплавкой глины [5, 7, 10]. При помощи мокрогравитационных мероприятий и без дополнительных процедур ГЦИ добывается однородности по первостепенным показателям составов: химических (оксидных и поэлементных), минералогического и фракционного.

ГЦИ – полукислое сырье (Al_2O_3 - 22,43%), среднепластичное (число пластичности 21-23), тугоплавкое (огнеупорность - 1580°C) и сильноспекающееся (интервал спекания 120-150°C) [3, 5, 7, 10].

Шамот, используемый в качестве отошителя, образуется при термообработке 1250°C ГЦИ до водопоглощения не более 5%, затем измельчается. В табл. 1 показано, что термообработанное глинистое сырье на «шамот» обогащается Al_2O_3 соответственно с 22,43 до 25,18%. В среднепластичные глины (число пластичности 21-23) при пластическом формовании для оптимизации характеристик композиций (составов) и керамических массах используют 40% различных отошителей [7, 10].

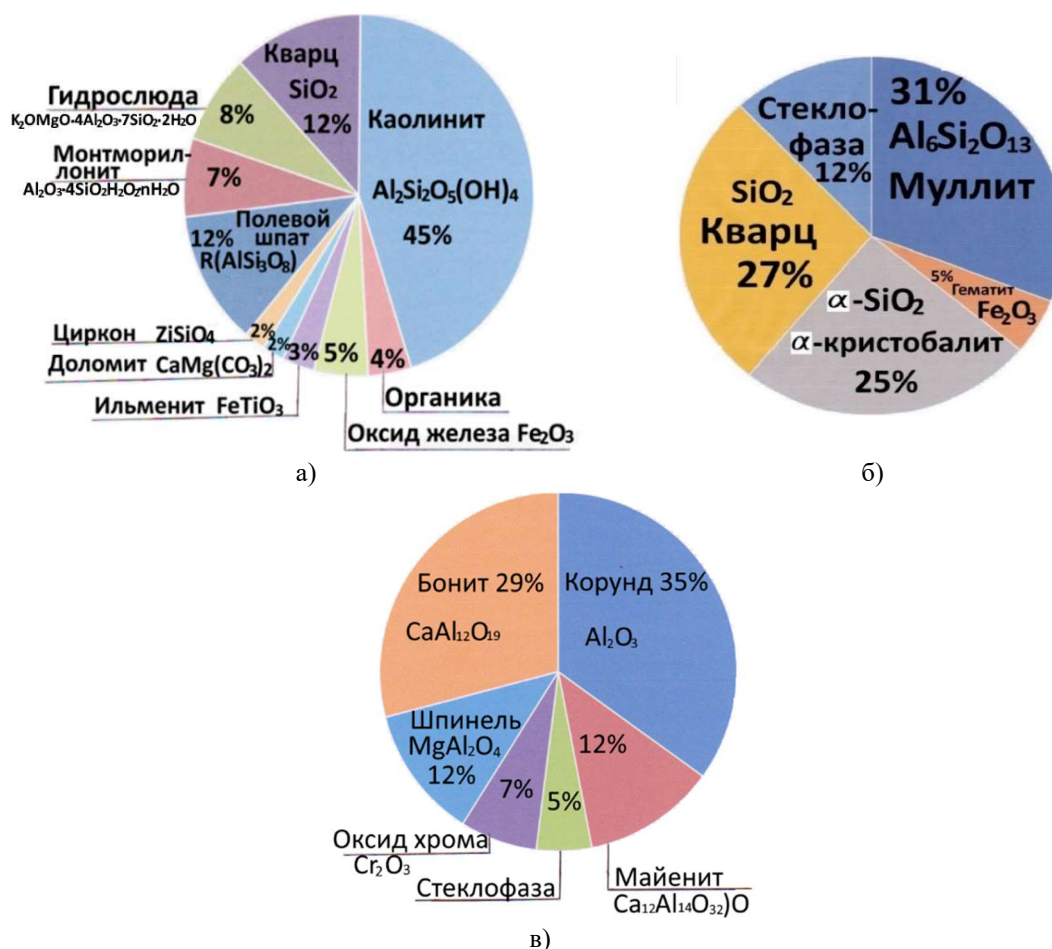


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых материалов: а) – ГЦИ; б) - шамот из ГЦИ;

в) феррохромовый алюминотермический шлак (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Mineralogical composition of raw materials: а) – the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores; б) – the clay part of the gravity "tails" of zircon-ilmenite ores chamotte; в) ferrochrome aluminothermic slag (illustration by the authors)

Феррохромовый алюминотермический шлак. Кардинальное отличие феррохромового алюминотермического шлака от образующихся многочисленных шлаков в металлургии, теплоэнергетики и в различных химических сегментах, - это присутствие глинозема (Al_2O_3), оксиды кальция (CaO), магния (MgO) и хрома (Cr_2O_3), концентрация которых может достигать соответственно: не менее, %: 60, 15, 13 и 7 (табл. 1). В работах [14, 15], состав исследуемого шлака описан трехкомпонентной системой $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (по компонентам, содержание которых в шлаке превышает 10%).

По физической форме (вещественному составу, микро- и макростроению и т.д.) феррохромовые алюминотермические шлаки делятся на два типа: каменные (монолитные) и самораспадающиеся (зернисто-порошковые). Исследуемый шлак относится к монолитным с ограниченным количеством ($\text{SiO}_2 < 2,0$ %, табл. 1) с уникальной порфиновой текстурой, мелко- и крупнозернистой структурой, в которой встречаются вкрапления (включения) магнезиальной шпинели [4, 15]. На рис. 2в показан минеральный состав шлака, а в табл. 4 ключевые показатели этих минералов, которые являются огнеупорными (температура плавления выше 1550°C).

Таблица 7

Свойства кристаллических фаз, входящих в феррохромовый алюминотермический шлак

Минерал	Содержание фракций в %, размер частиц в мм			
	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Плотность, г/см^3	Твердость по шкале Мооса	Микротвердость, кг/мм^2
1. Корунд Al_2O_3	2050	3,9-4,1	9	2108
2. Бонит $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	1850	3,38	6,5-7	1200-1300
3. Оксид хрома Cr_2O_3	2435	5,21	8,5	1900-2000
4. Майенит $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	1633-1728	2,9	6,0-6,5	1150-1250
5. Магнезиальная шпинель — MgAl_2O_4 ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	2135	4,05	7,5-8	1378-1505

Высокая концентрация глинозема в шлаке существенно увеличит прочность кислотоупора. В работах [14-16] было отмечено, что Al_2O_3 встречается в качестве корунда α — модификации, которая является аналогом природного корунда.

Взаимосвязь кислотостойкости образцов из композиций №1-3 с температурой обжига $950 - 1300^\circ\text{C}$ представлена на рис. 3, где 950°C — это температура начала образования жидкой фазы, а 1300°C — конечная температура обжига.

Кислотостойкость образцов из композиций №1-3, обожженных при температуре 1300°C , при различной концентрации серной кислоты и времени кипячения, представлена в табл. 8.

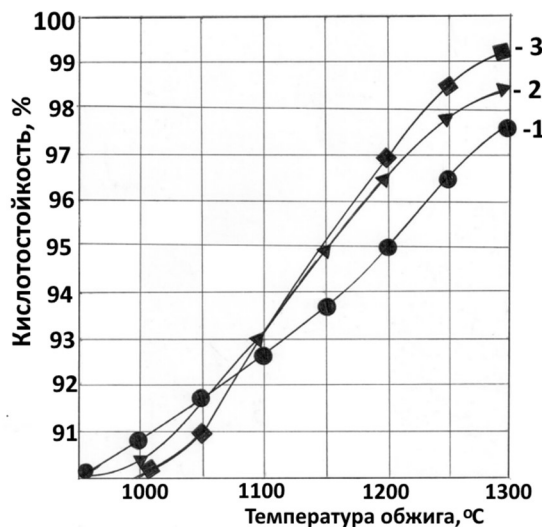


Рис. 3. Зависимость кислотостойкости от температуры обжига образцов из композиций №: 1, 2, 3 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of acid resistance on the firing temperature of samples from compositions No: 1, 2, 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	99,1	98,6	98,2	97,2	96,7	95,8	95,3	91,1

Самый быстрый рост кислотостойкости проявляется отчетливо в диапазоне температур 950-1200°C у кислотоупорных плитках состава №3 (с 90 до 97%, рис. 3), в 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 оксидов железа (соответственно $Fe_2O_3=6,74$ и $6,98$, табл. 1 и табл. 4) и открытых пор, содержание которые при температуре обжига 1300°C соответственно равны 7,19 и 6,53%, а в плитках композиции №3 всего 5,05% (табл. 6).

Из табл. 8 следует, что самому сильному разрушению подвергаются образцы из композиций, содержащих повышенные количества оксидов железа и открытых пор, в которые может затекать серная кислота. А образцы из композиции №3 помимо невысокого содержания оксидов железа ($Fe_2O_3 -3,87\%$) и открытых пор (5,05%, табл. 6), но еще содержит высокоогнеупорные минералы (огнеупорность превышает 2000°C, табл. 7), корунда (Al_2O_3), оксида хрома (Cr_2O_3) и магнезиальной шпинели ($MgAl_2O_4$ ($MgO \cdot Al_2O_3$)), которые значительно повышают не только огнеупорность, но и кислотостойкость.

Система $FeO-Al_2O_3-SiO_2$ не вызывает значительной заинтересованности для получения огнеупорных и кислотоупорных материалов в связи с содержанием легкоплавких эвтектик, причем наибольшую активность к образованию жидкой фазы при относительно низких температурах (менее 1000°C) проявляет вюстит (FeO) [18, 19].

Таким образом, для обеспечения кислотоупорам повышения кислотостойкости рекомендуется применять сырье с повышенной концентрацией оксида алюминия и минимизированным количеством оксида железа.

4. Заключение

1. Исследования показывают, что самый быстрый рост кислотостойкости отчетливо проявляется при обжиге кислотоупорных плиток в интервале температур 950-1200°C из композиции, содержащей 40% феррохромового алюминотермического шлака, по отношению к образцам не содержащий этот шлак.

2. Установлено, что при температуре обжига 1300°C анализируемые плитки составов, не содержащих феррохромовый алюминотермический шлак, отличаются высоким содержанием оксидов железа и открытых пор, поэтому кислотостойкость этих образцов не превышает 98%. Введение в композиции шлака повышает кислотостойкость до 99,2%.

3. Выявлено, что самому сильному разрушению подвергаются образцы из композиций, содержащих повышенные количества оксидов железа и открытых пор, в которые может затекать серная кислота. А образцы из композиции, содержащие шлак, помимо невысокого содержания оксидов железа ($Fe_2O_3 -3,87\%$) и открытых пор (5,05%, но и еще содержат высокоогнеупорные минералы (огнеупорность превышает 2000°C), корунда (Al_2O_3), оксида хрома (Cr_2O_3) и магнезиальной шпинели ($MgAl_2O_4$ ($MgO \cdot Al_2O_3$)), которые значительно повышают не только огнеупорность, но и кислотостойкость.

Список литературы/References

1. Biswal B., Mishra D.K., Das S.N., Bhuyan S. Structural, micro-structural, optical and dielectric behavior of mullite ceramics. // *Ceramics International*. 2021. №22(47). P. 32252—32263. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.120>.
2. 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. №2(56). P. 338—349. <http://doi.org/10.37190/ppmp/11776>

3. Davydov S. Ya., Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Valiev N. G. Application and delivery of clay raw materials in refractory plants // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023. №6(639). P. 602–605. <https://doi.org/10.1007/s11148-023-00776-3>.
4. 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. P. 39—56. <https://doi.org/10.24425/gsm.2021.136295>
5. 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. №8(166). P. 18—24. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115076>
6. 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*. 2020. (November 27—29) Saint Petersburg, 2020. P. 252—261.
7. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Western Kazakhstan Raw Materials for Producing Acid-Resistant Materials Refractories and industrial // *Ceramicsthis link is disabled* 2023. №6(63). P. 642–648. DOI: 10.1007/s11148-023-00784-3.
8. 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. №12(263). P. 1—23. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128306>.
9. 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. P. 139—242. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139>.
10. 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(31) 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. №2 (31). P. 76–85. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-76-85>.
11. 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.
12. Абдрахимова Е.С. Влияние пирофиллита на химическую стойкость кислотоупоров // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2000. №7. С. 46-49.
Abdrakhimova E.S. The influence of pyrophyllite on the chemical resistance of acid-resistant materials. // *News of higher educational institutions. Construction*. 2000. No. 7. P. 46-49.
13. 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.
14. Рытвин В. М., Перепелицын В.А., Понамаренко А.А., Гильванг С.И. Феррохромовые алюминотермические шлаки – техногенное сырье многофункционального применения. Часть 1. Вещественный состав и свойства феррохромовых шлаков. // *Новые огнеупоры*. 2017. №10. С. 8-14. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-10-8-14>

- Rytvin V. M., Perepelitsyn V.A., Ponamarenko A.A., Gilvang S.I. Ferrochrome aluminothermic slags as technogenic raw materials for multifunctional use. Part 1. The material composition and properties of ferrochrome slags. // New refractories. 2017. No. 10. P. 8-14. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-10-8-14>.
15. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Получение кислотоупорного материала на основе отходов металлургии без применения традиционных природных материалов. // Новые огнеупоры. 2023. №6. С. 44-51.
Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Obtaining acid-resistant material on the basis of metallurgy waste without the use of traditional natural materials. // New refractories. 2023. No. 6. P. 44-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2023-6-44-51>.
16. Четверикова А. Г., Макаров В. Н., Садыков А. Р., Каныгина О. Н., Филяк М. М., Смороков А. А., Трофимов А. Д. Синтез муллит-кремнеземной керамики с улучшенными электрофизическими свойствами. // Стекло и керамика. 2025: №9(98). С. 37-47. (на русском языке). DOI: 10.14489/glc.2025.09.pp.037-047
Chetverikova A. G., Makarov V. N., Sadykov A. R., Kanigina O. N., Filyak M. M., Smorokov A. A., Trofimov A. D. Synthesis of Mullite-Silica Ceramics with Improved Electrophysical Properties. // Glass and Ceramics. 2025: No. 9(98). P. 37-47. (in Russian). DOI: 10.14489/glc.2025.09.pp.037-047.
17. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Влияние нанотехногенного высокоглиноземистого сырья на физико-механические показатели и фазовый состав кислотоупоров // Новые огнеупоры. 2021. №8. С. 53-60.
Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Influence of nanotechnogenic high-alumina raw materials on the physical and mechanical properties and phase composition of acid-resistant refractories // New Refractories. 2021. No. 8. P. 53-60.
18. Абдрахимов В.З. Рециклинг отходов металлургии без применения природных традиционных материалов в производстве кислотоупорных материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 21-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28>
Abdrakhimov V.Z. Recycling of Metallurgical Waste without the Use of Natural Traditional Materials in the Production of Acid-Resistant Materials // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2023. Vol. 21. No. 2. P. 21-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28>
19. Шарафеев Ш.М., Сергеев Н.П., Меженин А.В. Влияние оксидов магния и железа на процессы фазообразования и спекания анортитовых материалов на основе природного сырья. // Известия вузов. Химия и химические технологии. 2024. №4 (67). С. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6940.
Sharafееv Sh.M., Sergeev N.P., Mezhenin A.V. Influence of magnesium and iron oxides on the processes of phase formation and sintering of anorthite materials based on natural raw materials. // News of universities. // Chemistry and Chemical Technologies. 2024. No. 4 (67). P. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6940

Информация об авторах

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

Сафронов Евгений Геннадьевич, кандидат экономических наук, доцент, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

Information about the author

Vladimir Z. Abdrakhimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Land management and ecology" Samara State University of Economics.
Email - e-mail: 3375892@mail.ru ORCID - ORCID 0000-0002-1832-2572

Evgeny G. Safronov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University
E-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

Дата поступления: 07.10.2025

Дата принятия: 29.04.2026