

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 171–184.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 171–184.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.32/.36:691.421:691.433

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184

EDN: PUJLFN

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Татьяна Викторовна Вакалова¹, Николай Петрович Сергеев¹,
Диас Талгатович Толегенов², Диана Жумабековна Толегенова^{1,2},
Наталья Александровна Митина¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

²Торайгыров университет, г. Павлодар, Республика Казахстан

Аннотация. Актуальность. Работа посвящена актуальной проблеме создания высокопрочных керамических материалов с использованием техногенных отходов.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения керамических и композиционных структур с использованием отходов химико-металлургических производств для создания новых видов высококачественной строительной керамики.

Поставленная цель достигается применением в качестве основного сырьевого компонента тугоплавкой глины с добавками высокожелезистого бокситового шлама. Функции бокситового шлама в составе композиций с алюмосиликатным сырьем при температуре обжига от 1100 до 1200 °С сводятся к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

Результаты. Установлено, что композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–132 МПа соответственно).

Выводы. Разработанные составы керамических масс с использованием красного шлама и установленные технологические режимы получения изделий определяют их перспективность для изготовления высокопрочной анортитовой и анортито-геленитовой строительной керамики по полусухой технологии.

Ключевые слова: тугоплавкая глина, красный шлам, синтез, спекание, анортит, геленит, механическая прочность

Для цитирования: Вакалова Т.В., Сергеев Н.П., Толегенов Д.Т., Толегенова Д.Ж., Митина Н.А. Перспективы использования красного шлама для получения высокопрочной строительной керамики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 171–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184. EDN: PUJLFN

ORIGINAL ARTICLE

RED MUD IN HIGH-STRENGTH CERAMICS PRODUCTION

Tatyana V. Vakalova¹, Nikolai P. Sergeev¹, Dias T. Tolegenov²,
Diana Zh. Tolegenova^{1,2}, Natalia A. Mitina¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Abstract. The work is devoted to the creation of high-strength ceramic materials with technogenic waste fillers.

Purpose: Investigation of the ceramic and composite production based on chemical and metallurgical wastes to create new types of high quality constructional ceramics.

Methodology/approach: The use of refractory clay with the addition of high-iron bauxite sludge as the main raw material. Bauxite sludge functions in compositions with aluminosilicate raw materials at burning at 1100 to 1200 °C, reduce to sintering due to its melting at 1150 °C.

Research findings: Refractory clay compositions with red mud in the amount of 20 to 50 % at the burning temperature of 1050 °C, provide the ceramic formation possessing the compressive strength 1.3 to 1.5 times higher than that of clay samples without additives, i.e., 91 and 122–132 MPa, respectively.

Value: The obtained ceramic compositions based on red mud determine a production of high-strength anorthite and anorthite-helenite ceramics using dry pressing.

Keywords: refractory clay, red mud, synthesis, sintering, anorthite, helenite, mechanical strength

For citation: Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh., Mitina N.A. Red mud in high-strength ceramics production. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 171–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184. EDN: PUJLFN

Введение

Интенсивное развитие производства современных керамических материалов, расширение их номенклатуры и ужесточение требований к их эксплуатационным свойствам сопровождаются активным потреблением высококачественного природного сырья, приводя к постепенному истощению его месторождений. Возникает необходимость расширения сырьевой базы, поиска замены традиционного сырья на новое природное и техногенное сырье [1, 2, 3, 4, 5].

Среди техногенных отходов особое место занимают шламы и шлаки металлургических производств. Ежегодно в результате производства различных металлов образуется большое количество металлургических отходов. Эти остатки считаются опасными из-за содержания в них растворимых металлов, что вызывает множество социальных проблем, таких как загрязненная вода, запыленный воздух и защелоченные почвы, а также риски для здоровья и безопасности людей и животных в результате распада отходов. Например, во всем мире глиноземная промышленность производит около 70 млн т опасных бокситовых остатков в год (так называемый красный шлам) [6, 7]. Отвалы красного шлама занимают большие площади земли и приводят ко многим серьезным экологическим проблемам. В связи с этим большую озабоченность вызывает поиск нового, эффективного способа повышения объемов утилизации красного шлама.

В настоящее время использование красного шлама привлекло значительные исследовательские интересы, такие как извлечение из них редкоземельных элементов и других ценных металлов [8], получение катализаторов [9] и материалов для защиты окружающей среды [10], стекол специального назначения [11] и др. Однако наиболее перспективно использование красного шлама в многотоннажных технологиях строительных материалов [12, 13, 14, 15, 16].

Целью настоящей работы является исследование процессов формирования фазового состава, структуры и свойств керамики на основе тугоплавкой глины с использованием красного шлама в качестве спекающей и упрочняющей добавки.

Методы исследования

В работе применялось оборудование Центра коллективного пользования Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

При изучении физико-химических и технологических свойств сырьевых материалов, масс и готовых изделий, а также процессов фазообразования в исследуемых объектах при нагревании в работе применялись современные физико-химические методы исследования: рентгеновский анализ (ДРОН-3М), оптическая и электронная микроскопия (SEM HITACHI S-570, РЭМ JSM-840 фирмы Jeol) и др.

Характеристика исходных сырьевых материалов

В качестве глинистого сырья в работе применялась тугоплавкая глина Кермезузского месторождения (Республика Казахстан). По содержанию фракции размером менее 1 мкм (63,3 %) исследуемая глинистая порода представляет собой разновидность высокодисперсных глин. По химическому составу (табл. 1) это полукислая глина с высоким содержанием красящих оксидов (> 3 % Fe₂O₃ и > 2 % TiO₂) в прокаленном состоянии, по минералогическому составу – преимущественно каолининовая глина с некоторым присутствием гидрослюда в глинистой части и примесного кварца в грубодисперсной части.

Таблица 1

Химический состав исследуемого сырья

Table 1

Chemical compositions of raw materials

Вид сырья	Содержание оксидов, масс. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	Δ _{тпрк}
Глина	60,31	22,00	1,37	3,17	0,65	2,29	1,19	0,22	1,16	7,67
	65,32	23,83	1,48	3,43	0,70	2,48	2,07	0,24	1,26	–
Красный шлам	21,03	7,47	2,16	17,27	23,46	2,33	0,31	0,43	1,12	24,37
	27,88	9,88	2,86	22,83	31,02	3,08	0,41	0,57	1,48	–

В качестве техногенного отхода применялся красный (бокситовый) шлам (отход от переработки железистых бокситов на технический глинозем по методу Байера на Павлодарском алюминиевом заводе Республики Казахстан). Ранее проведенные авторами исследования красного шлама [17] показали, что в исходном состоянии для него характерны высокие значения потери массы при прокаливании (до 24,37 %), что может осложнить его использование в технологическом процессе получения формованных керамических материалов.

В прокаленном состоянии в химическом составе шлама превалирует содержание оксида кальция CaO (31,02 %), оксида железа Fe_2O_3 (22,83 %) и оксида кремния SiO_2 (27,88 %), на долю которых приходится более 80 % (81,73 %) от общего содержания всех оксидов (табл. 1). Кальциевая составляющая представлена в виде кальцита CaCO_3 , гидросиликатов и алюминатов кальция в виде двухкальциевого гидросиликата $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ и шестикальциевого трехкарбонатного гидроалюмината $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Железистый компонент представлен гематитом Fe_2O_3 и магнетитом Fe_3O_4 [17]. После термообработки при 1100 °С минералогический состав кристаллической части красного шлама сложен трехкальциевым алюминатом $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, гематитом Fe_2O_3 , геленитом $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ и однокальциевым ферритом $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Оценка физико-механических свойств образцов полусухого прессования из тонкоизмельченного красного шлама, обожженных в интервале температур 900–1100 °С, свидетельствует об их полном спекании (до нулевого водопоглощения) при температуре 1100 °С с достижением прочности на сжатие до 230 МПа [17].

Таким образом, функции высокожелезистого бокситового шлама в составе композиций с алюмосиликатным сырьем (золами, глинами) при температуре обжига от 1100 до 1200 °С будут сводиться к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

Разработка керамического материала из сырьевых смесей системы «тугоплавкая глина – красный шлам»

Большие потери массы при прокаливании (до 25 %) бокситового шлама в исходном состоянии, осложняющие процесс его тонкого помола сухим способом в шаровых мельницах, обусловил необходимость предварительной термоподготовки шлама путем прокалывания при температуре 1000 °С, обеспечивающей его полную дегидратацию.

Подготовка керамических масс заключалась в тонком измельчении предварительно термообработанного (прокаленного) шлама в шаровой мельнице до полного прохода через сито 0063. Кемертурская глина измельчалась сухим способом до размера частиц менее 0,5 мм.

Тонкомолотый прокаленный красный шлам и глина дозировались в соотношении от 80:20 до 20:80 и тщательно гомогенизировались.

Образцы в виде таблеток и цилиндров формовались методом полусухого прессования под давлением 10 МПа. Для улучшения прессовочных свойств керамической массы шихта увлажнялась раствором органической связки. В качестве связующего использовался 1%-й раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ).

Исследования процесса спекания образцов из представленных композиций проводились в температурном интервале 1100–1150 °С с шагом 50 °С.

Характер спекания изучался по степени уплотнения обожженных образцов, характеризующейся такими физическими свойствами, как водопоглощение, огневая усадка, механическая прочность на сжатие.

Внешний вид обожженных образцов приведен на рис. 1, а результаты определения физико-механических свойств – на рис. 2.

Шифр массы	Температура обжига, °С		
	1050	1100	1150
Г ₁₀₀ Шл ₀			
Г ₈₀ Шл ₂₀			
Г ₇₀ Шл ₃₀			
Г ₆₀ Шл ₄₀			
Г ₅₀ Шл ₅₀			
Г ₄₀ Шл ₆₀			
Г ₃₀ Шл ₇₀			
Г ₂₀ Шл ₈₀			
Г ₀ Шл ₁₀₀			

Рис. 1. Внешний вид обожженных образцов полусухого прессования из смесей огнеупорной глины с красным шламом

Fig. 1. Burned samples produced by dry pressing from a mixture of refractory clay and red mud

Все анализируемые составы керамических масс в зависимости от соотношения тугоплавкой глины и красного шлама подразделялись на два типа:

1) смеси, в которых основой выступала тугоплавкая глина, красный шлам был добавкой (в количестве 10–40 %);

2) смеси, в которых основой был красный шлам, а глина – добавкой к нему (в количестве 10–40 %).

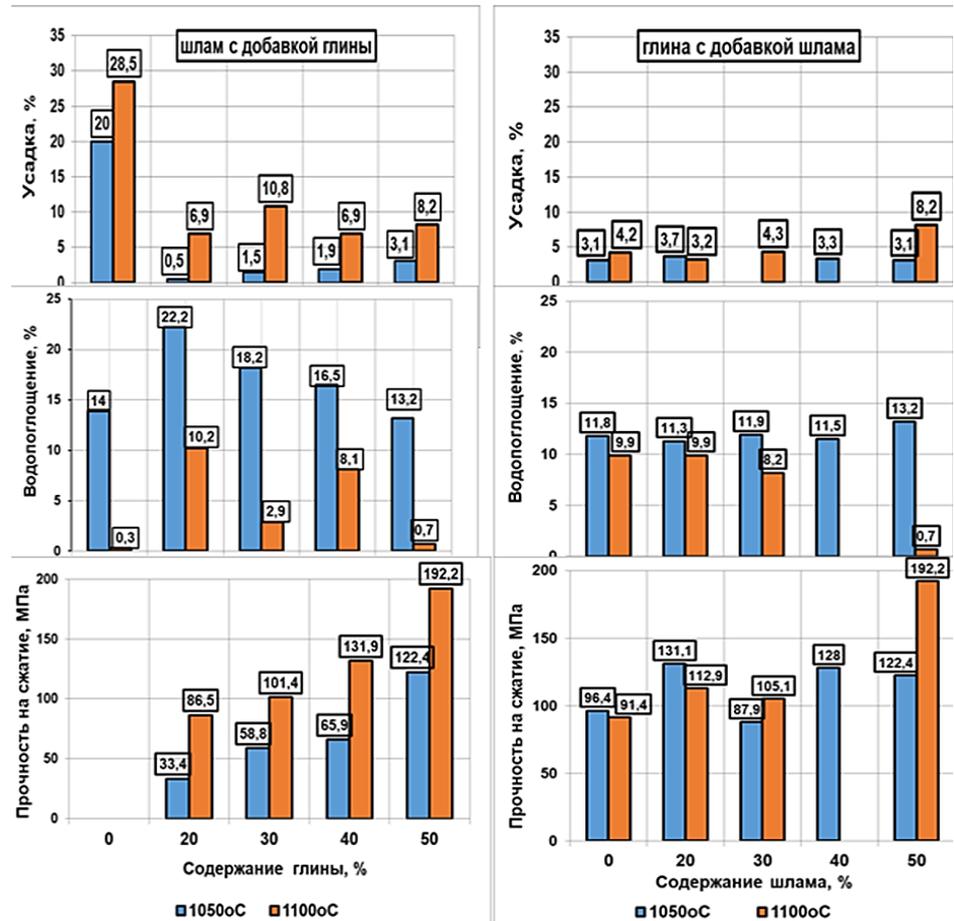


Рис. 2. Гистограмма изменения физико-механических свойств образцов полусухого прессования из композиций «тугоплавкая глина – красный шлам», обожженных в температурном интервале 1050–1100 °С

Fig. 2. Block diagrams for physical and mechanical properties of dry pressed samples from refractory clay and red mud mixture burned at 1050–1100 °С

Промежуточной была композиция с равным соотношением между глиной и шламом (50:50 %).

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при принятых температурах обжига 1050–1100 °С образцы полусухого прессования из тугоплавкой глины без добавок $\Gamma_{100}\text{Ш}_0$ характеризуются достаточно высокой прочностью на сжатие (91–96 МПа) при водопоглощении 10–12 % в зависимости от температуры обжига.

Дальнейшее повышение содержания добавки шлама к глине от 30 до 40 % сохраняет значения прочностных свойств до 128 МПа при температуре обжига образцов 1050 °С, что соответствует высокопрочной керамике (рис. 2).

В случае композиций, в которых основой является шлам, а глина выполняет функции добавки, введение глины в количестве 20–30 % и последующий обжиг прессованных образцов при температуре 1050 °С вызывают рез-

кое увеличение водопоглощения образцов: с 14 % (шлам без добавки глины) до 16,5–22 % (с добавкой 20–30 % глины). Повышение температуры обжига до 1100 °С активизирует процессы спекания образцов на основе шлама с добавками глины 20–40 %, приводя к снижению водопоглощения до 2,9–10,2 % и повышению прочности на сжатие до 130 МПа (рис. 2).

Объяснение указанным изменениям следует искать в физико-химических процессах, протекающих при обжиге этих композиций.

Для этого исследовался фазовый состав продуктов термообработки смесей рентгеновским методом.

Сопоставительный анализ полученных дифрактограмм позволил оценить видоизменения, претерпеваемые основными минералами исследуемой тугоплавкой глины с добавками красного шлама и красного шлама с добавками тугоплавкой глины в температурном интервале нагрева 1050–1100 °С (рис. 3).

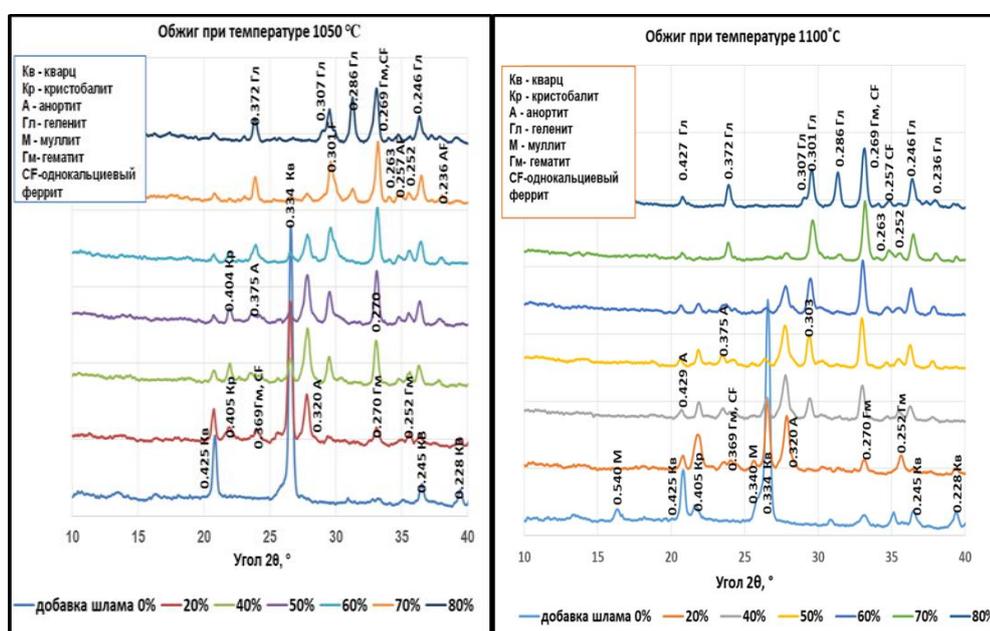


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы образцов из смеси «тугоплавкая глина – красный шлам», обожженных при температурах 1050–1100 °С

Fig. 3. XRD patterns for samples from refractory clay and red mud mixture burned at 1050–1100 °С

В случае композиций, в которых основой является тугоплавкая глина, а красный шлам используется в качестве добавки, выявлено, что уже при минимальном содержании добавки шлама в 20 %, начиная с 1050 °С, на дифрактограмме, кроме рефлексов кварца (примеси в глине), кристобалита и зачаточного муллита, образующихся при термодиссоциации каолинита, фиксируются наличие рефлексов анортита ($d = 0,320$ нм и др.).

Увеличение содержания шлама до 40 % при температуре 1050 °С сопровождается снижением интенсивностей рефлексов кварца ($d = 0,426$; $0,335$ нм и др.), кристобалита ($d = 0,410$ нм и др.), обусловленных присутствием глины

как основы, усилением рефлексов анортита и появлением рефлексов однокальциевого феррита ($d = 0,269$ нм). При дальнейшем увеличении содержания вводимого шлама к глине до 60–70 % интенсивность рефлексов анортита снижается, и при содержании добавки шлама более 60 % появляются рефлексы геленита ($d = 0,307; 0,285$ нм и др.).

При повышении температуры обжига до 1100 °С характер протекания процессов фазообразования сохраняется, меняется лишь интенсивность рентгеновских рефлексов.

Таким образом, добавка шлама к тугоплавкой исследуемой глине в количестве 20–50 % и обжиг при 1050–1100 °С обеспечивают получение керамики преимущественно с анортитовой кристаллической фазой, а с содержанием красного шлама 70–80 % в смеси с глиной – керамики с геленитовой кристаллической фазой.

Проведенные исследования позволяют определиться с оптимальными составами и технологическими режимами получения керамики на основе исследуемого сырья (табл. 2).

Таблица 2

Рекомендуемые составы композиций, технологические параметры и свойства керамики на основе смесей тугоплавкой глины с красным шламом

Table 2

Compositions and process properties of ceramics based on refractory clay and red mud

Шифр состава	Состав, %		Температура обжига, °С	Свойства обожженного керамического материала			Кристаллическая фаза
	Глина	Шлам		Усадка, %	Водопоглощение, %	Прочность на сжатие, МПа	
Из тугоплавкой глины без добавок							
Г ₁₀₀ Ш ₀	100	0	1050	4,2	9,8	91,4	Кварц, муллит
Из тугоплавкой глины с добавкой шлама							
Г ₈₀ Ш ₂₀	80	20	1100	3,7	11,3	131,1	Кварц, анортит, кристобалит
Г ₆₀ Ш ₄₀	60	40	1050	3,3	11,5	128,7	Анортит
Г ₅₀ Ш ₅₀	50	50	1050	3,1	13,2	122,4	
Из красного шлама с добавкой тугоплавкой глины							
Ш ₆₀ Г ₄₀	40	60	1100	6,9	8,0	131,9	Геленит, анортит

Таким образом, композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–131 МПа соответственно).

Электронная микроскопия позволила оценить структуру обожженных образцов (рис. 4–6).

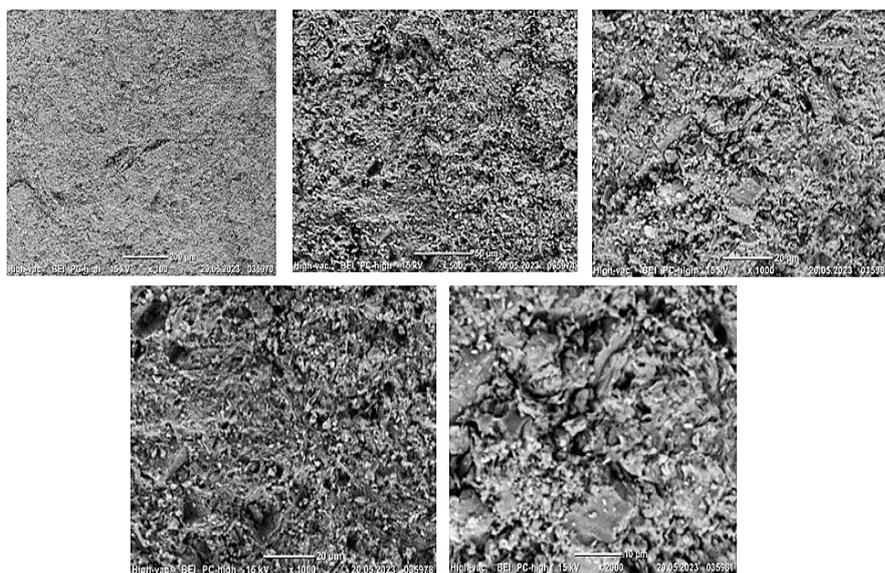


Рис. 4. Электронные микроснимки скола образцов полусухого прессования из тугоплавкой глины без добавок (состав Г₁₀₀Шл₀), обожженных при температуре 1050 °С

Fig. 4. Optical images of dry pressed samples burned at 1050 °C from refractory clay without red mud (C100RM0 composition)

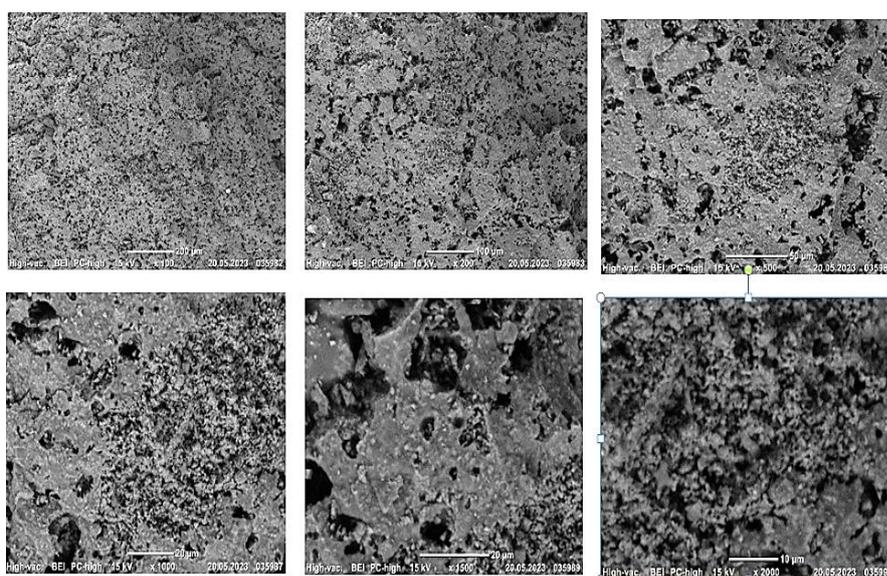


Рис. 5. Электронные микроснимки скола образцов полусухого прессования из тугоплавкой глины с добавкой красного шлама в количестве 40 % (состав Г₆₀Шл₄₀), обожженных при температуре 1050 °С

Fig. 5. Optical images of dry pressed samples burned at 1050 °C from 60 % of refractory clay and 40 % of red mud (C60RM40 composition)

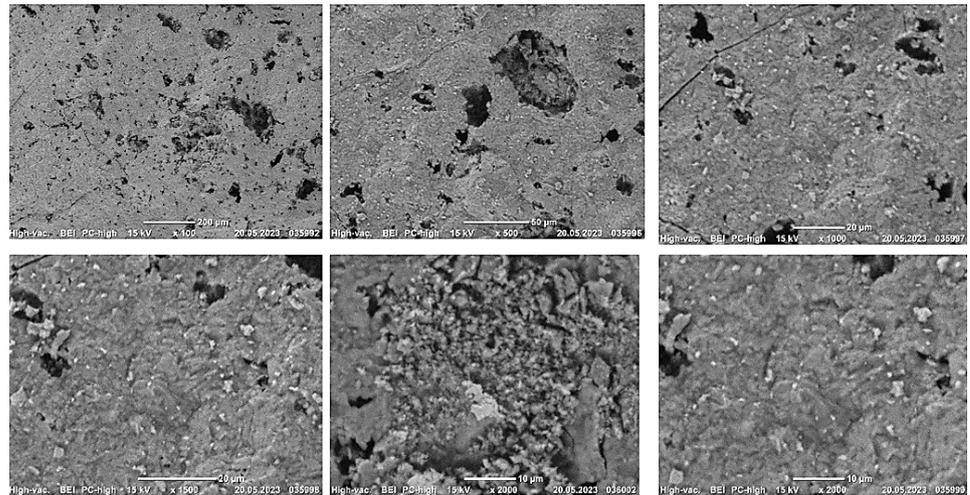


Рис. 6. Электронные микроснимки скота образцов полусухого прессования из красного шлама с добавкой тугоплавкой глины в количестве 30 % (состав Шл₇₀Г₃₀), обожженных при температуре 1100 °С

Fig. 6. Optical images of dry pressed samples burned at 1100 °С from 70 % of red mud and 30 % of refractory clay (RM70 C30 composition)

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям скота образцов полусухого прессования из кемертузской глины без добавок шлама Г₁₀₀Шл₀, обожженных при 1050 °С (рис. 4), выявлено, что они представляют собой рыхлоспекшийся пористый керамический материал, сложенный отдельными мелкопористыми агрегатами, отделенными друг от друга глубокими извилистыми порами.

При введении в состав кемертузской глины добавки красного шлама в количестве 40 % (состав Г₆₀Шл₄₀) структура обожженных образцов по-прежнему остается пористой (рис. 5).

Это согласуется с одинаковыми значениями водопоглощения образцов глины без добавок и с добавкой 40 % шлама, равными 11,8 и 11,5 % соответственно, при температуре обжига 1050 °С. Однако в случае добавки красного шлама прослеживается его активирующее действие на процесс спекания образцов. Это проявляется в образовании наряду с рыхлоспеченными участками фрагментов с монолитной структурой с разобщенными внутренними порами, по форме приближающимися к сферической, что характерно для жидкофазного спекания. Такое различие в микроструктуре обожженных образцов с добавкой 40 % шлама определяет более высокие значения прочности по сравнению с образцами из глины без добавки – 128 и 91 МПа при одинаковых значениях их водопоглощения.

Увеличение количества добавки шлама к кемертузской глине до 70 % в составе Шл₇₀Г₃₀ еще более активирует процесс жидкофазного спекания образцов, что проявляется на микроснимках в формировании плотноспеченной монолитной структуры с внутренними порами округлой формы с размерами от 5–10 до 25–50 мкм (рис. 6). Такая степень спекания хорошо согласуется с водопоглощением образцов, обожженных при 1100 °С, равным 2,5 % (см. рис. 2).

Выводы

1. Функции высокожелезистого бокситового шлама в составе композиций с тугоплавкой глиной при температуре обжига от 1100 до 1200 °С сводятся к спекающему действию за счет собственного плавления при 1150 °С.

2. В случае использования красного шлама для получения керамических материалов его необходимо предварительно прокалить при температуре не менее 1000 °С, обеспечивающей его полную дегидратацию в сырье, а не в формованном изделии.

3. Композиции тугоплавкой глины с добавками красного шлама от 20 до 50 % при температуре обжига 1050 °С образуют керамические структуры преимущественно с анортитовой кристаллической фазой, с прочностью на сжатие, в 1,3–1,5 раза превышающей прочность образцов из исследуемой глины без добавки (91 и 122–132 МПа соответственно).

4. Использование композиции красного шлама с добавкой тугоплавкой глины в количестве 40 % и обжиг при температуре 1100 °С обеспечивают получение анортито-геленитовой керамики с водопоглощением до 8 %, с прочностью на сжатие до 132 МПа.

5. Разработанные составы керамических масс и технологические режимы определяют их перспективность для получения по полусухой технологии высокопрочной анортитовой и анортито-геленитовой керамики конструкционного и отделочного назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ozturk S., Sutcu M., Erdogmus E., Gencel O.* Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 217. P. 592–599. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114>
2. *Munoz P., Morales M.P., Mendivil M.A., Juarez M.C., Munoz L.* Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 71. P. 181–187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.027>
3. *Gencel O.* Characteristics of fired clay bricks with pumice additive // *Energy and Buildings*. 2015. V. 102. P. 217–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
4. *Gencel O., Erdogmus E., Sutcu M., Oren O.H.* Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 255. P. 119362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
5. *Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A.* Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics // *Review of Russian experience for the years 2000–2015, Waste Management*. 2017. V. 60. P. 230–246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>
6. *Archambo M., Kawatra S.K.* Red Mud: Fundamentals and new avenues for utilization // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. V. 42. № 7. P. 427–450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109
7. *Li R., Zhang T., Liu Y., Li G., Xie L.* Calcification–carbonation method for red mud processing // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. V. 316. P. 94–101. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.04.072
8. *Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T.* Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. V. 2. P. 365–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
9. *Taneez M., Hurel C.* A review on the potential uses of red mud as amendment for pollution control in environmental media // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26. P. 22106–22125. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05576-2>

10. Das B., Mohanty K. A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud // *Renewable Energy*. 2019. V. 143. P. 1791–1811. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.114>
11. Marlitan W., Venkateswara, Rao P., Tekin H.O., Sayyed M.I., Klement R, Galusek D., Lakshminarayana G., Syam Prasad P., Veeraiah N. Analysis of red mud doped Bi₂O₃-B₂O₃-BaO glasses for application as glass solder in radiation shield repair using MCNPX simulation // *Ceramics International*. 2019. V. 45. № 6. P. 7619–7626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.058>
12. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2006. V. 26. № 1. P. 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603
13. Xia F., Cui S., Pu X. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste // *Ceramics International*. 2022. V. 48. № 4. P. 5197–5203. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.059
14. Sglavo V.M., Campostrini R., Maurina S., Carturan G., Monagheddu M., Budroni G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: thermal behavior // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. V. 20. № 3. P. 235–244. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00088-6
15. Sglavo V.M., Maurina S., Conci A., Salviati A., Carturan G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. V. 20. № 3. P. 245–252. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00156-9
16. Liu S., Guan X., Zhang S., Dou Z., Feng C., Zhang H., Luo S. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism // *Ceramics International*. 2017. V. 43. № 15. P. 13004–13008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.036
17. Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh. High-strength building ceramics based on fly ash – red mud mixtures // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. V. 121. № 5. P. 12104. DOI: 10.34910/MCE.121.4

REFERENCES

1. Ozturk S., Sutcu M., Erdogmus E., Gencel O. Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures. *Construction and Building Materials*. 2019; 217: 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.114>
2. Munoz P., Morales M.P., Mendivil M.A., Juarez M.C., Munoz L. Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction. *Construction and Building Materials*. 2014; 71: 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.027>
3. Gencel O. Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings*. 2015; 102: 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
4. Gencel O, Erdugmus E., Sutcu M., Oren O.H. Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2020; 255: 119362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
5. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015, *Waste Management*. 2017; 60: 230–246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>
6. Archambo M., Kawatra S.K. Red Mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021; 42(7): 427–450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109
7. Li R., Zhang T., Liu Y., Li G., Xie L. Calcification–carbonation method for red mud processing. *Journal of Hazardous Materials*. 2016; 316: 94–101. DOI:10.1016/j.jhazmat.2016.04.072
8. Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T. Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016; 2: 365–386. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
9. Taneez M., Hurel C. A review on the potential uses of red mud as amendment for pollution control in environmental media. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; 26: 22106–22125. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05576-2>

10. Das B., Mohanty K. A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud. *Renewable Energy*. 2019; 143: 1791–1811. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.114>
11. Marlton W., Venkateswara, Rao P., Tekin H.O., Sayyed M.I., Klement R, Galusek D., Lakshminarayana G., Syam Prasad P., Veeraiah N. Analysis of red mud doped Bi₂O₃-B₂O₃-BaO glasses for application as glass solder in radiation shield repair using MCNPX simulation. *Ceramics International*. 2019; 45(6): 7619–7626. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.058>
12. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2006; 26 (1): 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603
13. Xia F., Cui S., Pu X. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste. *Ceramics International*. 2022; 48 (4): 5197–5203. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.059
14. Sglavo V.M., Campostrini R., Maurina S., Carturan G., Monagheddu M., Budroni G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: Thermal behavior. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000; 20 (3): 235–244. DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00088-6
15. Sglavo V.M., Maurina S., Conci A., Salviati A., Carturan G., Cocco G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: Production of clay-based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000; 20 (3): 245–252 DOI: 10.1016/S0955-2219(99)00156-9
16. Liu S., Guan X., Zhang S., Dou Z., Feng C., Zhang H., Luo S. Sintered bayer red mud based ceramic bricks: Microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism. *Ceramics International*. 2017; 43 (15): 13004–13008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.036
17. Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh. High-strength building ceramics based on fly ash – red mud mixtures. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 121 (5): 12104. DOI: 10.34910/MCE.121.4

Сведения об авторах

Вакалова Татьяна Викторовна, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, tvv@tpu.ru

Сергеев Николай Петрович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, axioma-13@yandex.ru

Толегинов Диас Талгатович, ст. преподаватель, Торайгыров университет, 140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, tolegenov@tpu.ru

Толегинова Диана Жумабековна, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Торайгыров университет, 140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, tolegenova@tpu.ru

Митина Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, mitinana@tpu.ru

Authors Details

Tatyana V. Vakalova, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, tvv@tpu.ru

Nikolay P. Sergeev, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, axioma-13@yandex.ru

Dias T. Tolegenov, Senior Lecturer, A/Professor, Toraighyrov University, 64, Lomov Str., 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, tolegenov@tpu.ru

Diana Zh. Tolegenova, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, tolegenova@tpu.ru

Natalia A. Mitina, PhD, A/Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, mitinana@tpu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024
Одобрена после рецензирования 21.02.2024
Принята к публикации 15.03.2024

Submitted for publication 01.02.2024
Approved after review 21.02.2024
Accepted for publication 15.03.2024