

Научная статья
УДК 669.712
EDN: WYVZQG
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-790-799

МЕТАЛЛУРГИЯ



Низкотемпературное спекание бокситового сырья со щелочью – альтернативная технология переработки бокситов по параллельному варианту способа Байер-спекания

И.В. Логинова¹, А.В. Кырчиков^{2✉}, Л.И. Чайкин³, Ю.А. Напольских⁴

¹⁻⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – разработка альтернативной технологии переработки бокситового сырья на основе низкотемпературного спекания боксита с каустической щелочью, а также решение вопроса борьбы с углеродным следом на глиноземных заводах Урала. Лабораторные испытания проводились спеканием искусственно полученного бемита и гематита с химически чистой каустической щелочью при температурах 300, 500 и 700°C и дальнейшем их выщелачивании в слабощелочных растворах. Для изучения фазового, химического и гранулометрического составов красных шламов после выщелачивания в исследованиях были использованы различные физико-химические методы анализа: рентгенофлуоресцентный, метод титрования, рентгенофазовый, сканирующая электронная микроскопия, магнитометрия с вибрирующим образцом; для определения удельной площади поверхности и пористости использовали метод Брунауэра-Эммета-Теллера. В результате изучения кинетики прохождения твердофазной реакции взаимодействия бемита с каустической щелочью установлено, что в изучаемом температурном диапазоне взаимодействие идет в кинетическом режиме. Показано также, что при спекании гематита при температурах 300 и 500°C и дальнейшем выщелачивании спека водой происходит минералогическое изменение шлама с получением нового минерала – маггемита, обладающего магнитными свойствами. При изучении магнитных свойств красного шлама низкотемпературного спекания боксита установлено, что намагниченность достигает значения насыщения 19–20 электромагнитных единиц на г (при плотности образца 2,38 г/см³) при магнитном поле 10 кЭ. Удельная площадь поверхности этих образцов составила 54,97 и 51,77 м²/г. Выполненные исследования подтверждают возможность адаптации предложенной технологии для бокситов с получением высокожелезистых красных шламов. Это способствует комплексной переработке бокситового сырья и изучению возможности снижения углеродных выбросов на глиноземных заводах за счет исключения операции спекания с содой и известняком, которая сопровождается выделением CO₂ при разложении этих соединений.

Ключевые слова: алюминат натрия, каустическая щелочь, маггемит, спекание, красный шлам, углеродный след

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-29-01515.

Для цитирования: Логинова И.В., Кырчиков А.В., Чайкин Л.И., Напольских Ю.А. Низкотемпературное спекание бокситового сырья со щелочью – альтернативная технология переработки бокситов по параллельному варианту способа Байер-спекания // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 790–799. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-790-799>. EDN: WYVZQG.

METALLURGY

Original article

Low-temperature sintering of bauxite raw material with alkali as an alternative to the parallel Bayer sintering process

Irina V. Loginova¹, Aleksey V. Kyrchikov^{2✉}, Leonid I. Chaikin³, Yulia A. Napolskikh⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The aim is to develop an alternative technology of bauxite raw material processing based on low-temperature sintering of bauxite with caustic alkali, as well as to solve the issue of carbon footprint control at alumina refineries in the Urals. Laboratory tests were carried out by sintering artificial bemitite and hematite with chemically pure caustic alkali at

temperatures of 300, 500 and 700°C and their further leaching in weakly alkaline solutions. To study the phase, chemical, and particle size distribution of red muds after leaching, various physical and chemical methods of analysis were used, such as X-ray fluorescence, titration method, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, magnetometry with a vibrating sample. The Brunauer – Emmett – Teller method was used to determine the specific surface area and porosity. The study of the kinetics of the solid-phase reaction of the bemitite interaction with caustic alkali has shown the kinetic interaction in the temperature range under study. Moreover, sintering of hematite at temperatures of 300 and 500°C and further leaching of the sinter with water resulted in mineralogical changes in the sludge with the production of a new mineral, maghemite, which possesses magnetic properties. When studying the magnetic properties of red mud of low-temperature sintering of bauxite, we determined that the magnetization was as high as 19–20 electromagnetic units per g (at a sample density of 2.38 g/cm³) at a magnetic field of 10 kE. The specific surface area of these samples was 54.97 and 51.77 m²/g. The performed studies confirm that the proposed technology can be adapted for bauxite to produce high-iron red slimes, thus contributing to the integrated processing of bauxite raw materials. In addition, ways to reduce carbon emissions at alumina refineries by eliminating the sintering operation with soda and limestone, which is accompanied by CO₂ emission during decomposition of these compounds, can be studied.

Keywords: sodium aluminate, caustic alkali, maghemite, sintering, red mud, carbon footprint

Funding: The work was funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01515.

For citation: Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Chaikin L.I., Napolskikh Yu.A. Low-temperature sintering of bauxite raw material with alkali as an alternative to the parallel Bayer sintering process. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):790-799. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-790-799>. EDN: WYVZQG.

ВВЕДЕНИЕ

Для улучшения основных показателей работы глиноземных заводов требуется непрерывная модернизация технологических переделов производства, изучение возможности снижения потребления энергоресурсов, топлива, достижение максимального извлечения полезных компонентов из перерабатываемого сырья, а также исследование возможности переработки полученных красных шламов, которые относятся к категории техногенных отходов.

Кроме того, актуальными остаются задача разработки альтернативных, экономически выгодных способов переработки низкокачественных бокситовых руд и решение проблемы утилизации красных шламов с перспективой в дальнейшем использовать их для производства железосодержащих концентратов и концентратов редкоземельных металлов (РЗМ). Эти проблемы описаны в электронном ресурсе ООО «БизнесСтат»⁵ и в источниках [1, 2].

В настоящий момент на глиноземных заводах Урала для переработки бокситового сырья используется технологическая схема параллельного варианта Байер-спекания, которая позволяет перерабатывать как высококачественное бокситовое сырье в способе Байера, так и низкокачественное в способе спекания⁶ [3]. Данная технология была опробована и внедрена еще в 60-х годах прошлого столетия.

В этом способе энергоемкими являются как процесс выщелачивания бокситов в автоклавах при высоких температурах и мощных давлениях в ветви гидрохимии, так и процесс спекания при переработке низкокачественных бокситов. Спекание характеризуется большим расходом топлива [4, 5] и высоким выходом красного шлама. Для снижения себестоимости производства глинозема при использовании в качестве сырья низкокачественных бокситов Среднего Тимана необходимо стремиться к уменьшению затрат при его переработке как по способу Байера в гидрохимической ветви, так и в технологическом цикле ветви спекания. Это можно осуществить при реализации предлагаемого технологического решения низкотемпературного спекания бокситового сырья с каустической щелочью при температуре 300–400°C, что позволяет достигнуть максимального извлечения полезных компонентов из исходного сырья, а также сокращением выхода красного шлама практически в два раза, по сравнению с существующим в настоящий момент [6, 7], и в перспективе с возможностью комплексной переработки боксового сырья с получаемых стандартных промышленных растворов.

При использовании предлагаемой технологии снижается углеродный след от производства глинозема [8]. В работах [9–11] показано сколько CO₂ выделяется при произ-

⁵Анализ мирового рынка глинозема в 2018–2022 гг, прогноз на 2023–2027 гг // ООО «БизнесСтат» [Электронный ресурс]. URL: https://businessstat.ru/images/demo/alumina_world_demo_businessstat.pdf (08.11.2023).

⁶Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема: учеб. пособ. М.: Металлургия, 1978. 344 с.

водстве Al. В настоящий момент основным источником CO_2 на Российских глиноземных заводах является высокотемпературный передел спекания, где основными компонентами шихты являются углекислая (кальцинированная) сода (Na_2CO_3), известняк (CaCO_3) и боксит. Все превращения, проходящие во вращающихся трубчатых печах, сопровождаются выделением углекислого газа (CO_2). При производстве каждой тонны глинозема выделяется до 220 кг CO_2 , соответственно Уральские глиноземные комбинаты выделяют более 400 тыс. т CO_2 ⁷. По приближенным расчетам в ЕС одна тонна выбросов углекислого газа в окружающую среду оплачивается предприятием в размере 50 долл за 1 т [12, 13]. Именно такой размер оплаты позволяет оправдать переход на экологически чистые методы производства металлов. Кроме того, в настоящий момент Президентом РФ подписана Климатическая доктрина России⁸, целью которой является достижение баланса между выбросами промышленных предприятий и их поглощением к 2060 г. Также Россия намерена полностью выполнить международные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов.

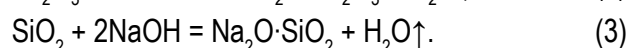
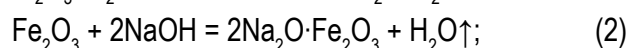
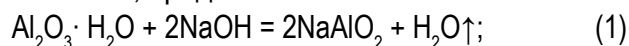
ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является изучение твердофазных реакций предлагаемой технологии низкотемпературного спекания бокситового сырья с каустической щелочью, исследование кинетики растворения алюмината натрия, фазового состава и физических свойств, получаемых после выщелачивания спеков красных шламов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях с целью определения оптимальных условий протекания твердофазных реакций спекания основных компонентов бокситового сырья по предлагаемой технологии были проведены исследования на искусственно полученном минерале бемита с целью получения алюмината натрия, а также проведены опыты низкотемпературного спекания на химически чистом реактиве оксида железа с целью получения феррита натрия. После выщелачивания данных продуктов устанавливался процент

извлечения полезных компонентов в раствор и выход красного шлама в зависимости от температуры спекания, которая варьировалась от 300°C до 700°C. Также были получены кинетические кривые извлечения алюминия из алюмината натрия. Твердая фаза гематитового шлама в дальнейшем подвергалась различным физико-химическим методам анализа с целью изучения ее фазового состава. Для этого был применен рентгенофазовый анализ (РФА), электронная микроскопия, определена удельная площадь поверхности образцов с применением метода математического описания физической адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ). Далее, с целью подтверждения и проверки полученных исследований, проведенных на искусственно полученных минералах, были продолжены опыты по спеканию бокситов Среднего Тимана в тех же условиях. Эксперименты по выщелачиванию бокситового спека в дистиллированной воде проводились в лабораторном реакторе, оборудованном верхнеприводной мешалкой и датчиком контроля температуры процесса. Шлам также анализировали с привлечением различных физико-химических методов анализа. Химические реакции, протекающие при спекании, представлены ниже:



Для эксперимента по изучению кинетики извлечения алюминия при спекании бемита с каустической щелочью был использован бемит, полученный гидротермальным способом в лаборатории путем выдержки продукционного гидроксида алюминия Уральского алюминиевого завода в автоклаве, в дистиллированной воде, при температуре 260°C и Ж:Т = 4:1 в течение 1 ч.

Полученный бемит подвергался операции спекания с каустической щелочью при различных температурах и продолжительности (рис. 1). Массовое отношение NaOH к бемиту составляло 1,1:1, затем спек выщелачивался водой при 90°C в течение 0,5 ч при Ж:Т как 5:1 для всех полученных спеков.

Варьируемыми параметрами являлись температура (200–400°C с шагом 100°C), про-

⁷Савченко А.И. Автоматизированный расчет материального баланса производства глинозема по комбинированной схеме Байер-спекание. Краснотурьинск: УГТУ-УПИ, 2001. 123 с.

⁸Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 26 окт. 2023 № 812 (ред. от 17.12.2009). Собрание законодательства РФ 30.10.2023 № 44 (часть III), ст. 7865.

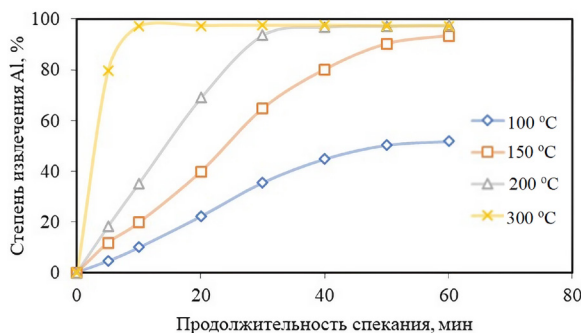


Рис. 1. Кинетические кривые извлечения алюминия из спека при спекании бемита с каустической щелочью
Fig. 1. Kinetic curves of aluminum extraction from cake when sintering boehmite and caustic alkali

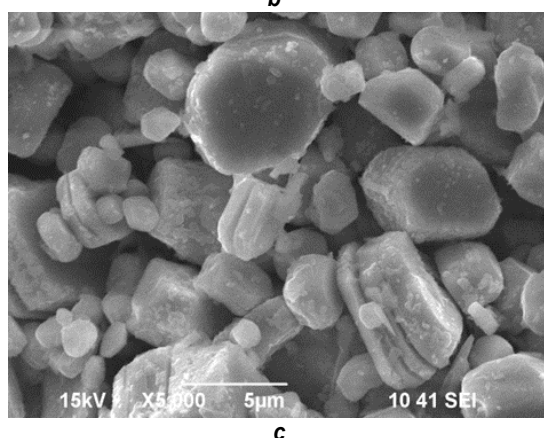
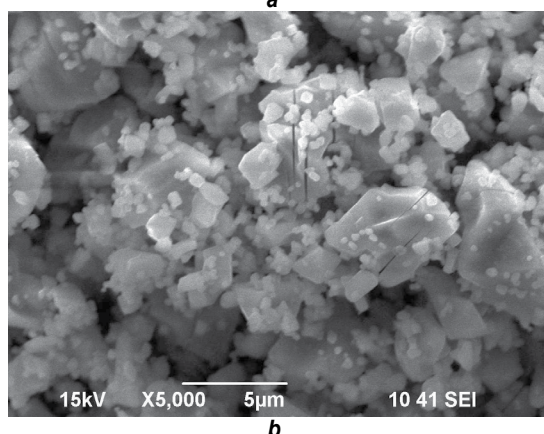
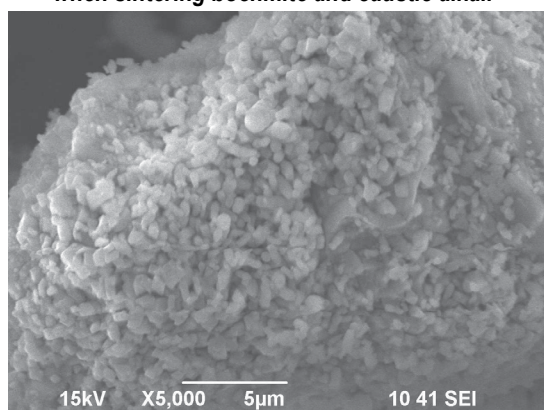


Рис. 2. Электронная микрофотография красного шлама после выщелачивания спеков, полученных при спекании гематита со щелочью при температурах: а – 300, б – 500, с – 700 °С

Fig. 2. Electron micrograph of red mud resulting from leaching the cakes obtained by hematite and alkali sintering at the temperatures of: a – 300, b – 500, c – 700 °C

должительность (30–90 мин с шагом 30 мин) и массовое отношение NaOH к бокситу (0,8–1,2 с шагом 0,2). Лучше всего для описания процесса подошла нейронсетевая модель на основе многослойного персептрона 3-10-1, где 3 – количество входов, 10 – количество скрытых слоев, 1 – количество выходов. Данная модель не имеет аналитического выражения, но она позволяет описывать экспериментальные данные с высокой точностью ($R^2 = 0,985$).

По кинетическим кривым на рис. 2 видно, что спекание с NaOH уже при 200 °С в течение 30 мин позволяет извлекать из боксита практически весь глинозем. Данная температура сопоставима с выщелачиванием в цикле Байера, но не требует автоклавного оборудования.

Далее нами были проведены исследования свойств твердых остатков и фазовых превращений гематита при спекании его со щелочью с последующим выщелачиванием спека водой. Эксперименты осуществлялись при температурах 300, 500, 700 °С с охлаждением спека вместе с печью. В дальнейшем спек выщелачивали в воде, твердая фаза отделялась на вакуумной установке с шестикратной промывкой горячей дистиллированной водой и сушкой полученной твердой фракции при температуре 110 °С в течение 2 ч. Затем высушенная фракция вновь подвергалась выщелачиванию водой в течение 1 ч при температуре 90 °С с целью отмывки оставшейся щелочи. Полученный продукт подвергался различным методам физико-химического анализа: электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, БЭТ. Результаты электронной микроскопии продуктов представлены на рис. 3.

По результатам энергодисперсионного анализа среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 300 °С составило, % масс.: О – 12,3; Na – 0,83; Fe – 79,7.

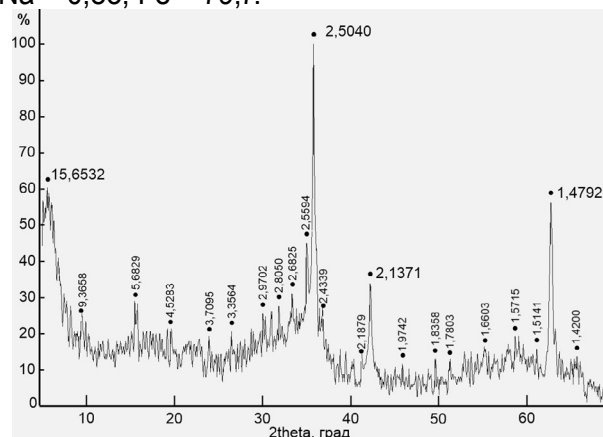


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ образца 300 °С
Fig. 3. X-ray diffraction analysis of the sample at 300 °C

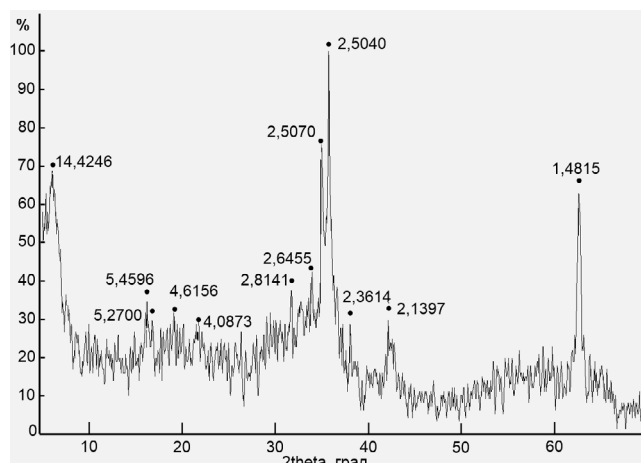


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ образца 500°C
Fig. 4. X-ray diffraction analysis of the sample at 500°C

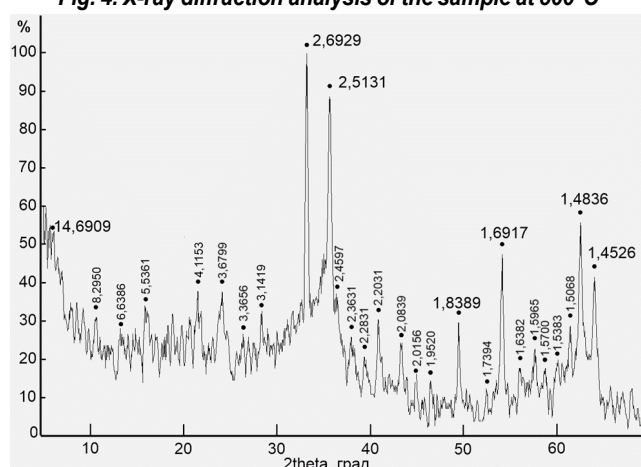


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ образца 700°C
Fig. 5. X-ray diffraction analysis of the sample at 700°C

Среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 500°C составило, % масс.: O = 10,9; Na = 0,82; Fe = 88,3.

Среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 700°C составило, % масс.: O = 12,5; Na = 1,52; Fe = 85,6.

Затем с целью определения фазового состава полученных шламов был проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого представлены на рис. 3-5.

Изучая представленные выше рентгено-

граммы образцов при 300, 500, 700°C, можно достоверно утверждать наличие трех основных фаз в них – Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Образцы при 300°C и 500°C представлены в основном маггемитом, а 700°C – гидроксидными фазами железа.

Одним из физических методов анализа являлся метод БЭТ, используемый для определения удельной площади поверхности изучаемых образцов. Результаты анализа приведены в табл. 1. Видно, что наибольшей площадью поверхности обладал шлам, полученный при 300°C. Кроме всего прочего, было обнаружено, что наличие в пробах $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ придает им магнитные свойства.

В дальнейшем в лаборатории было проведено исследование выявленных закономерностей на реальном объекте – боксита Средне-Тиманского месторождения. Изучалось варьирование различных параметров процесса на степень извлечения алюминия из бокситов Среднего Тимана и выход красного шлама. Химический анализ использованного для эксперимента боксита представлен в табл. 2.

Изучая представленные выше рентгенограммы образцов при 300, 500, 700°C, можно достоверно утверждать наличие трех основных фаз в них – Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Образцы при 300°C и 500°C представлены в основном маггемитом, а 700°C – гидроксидными фазами железа.

Одним из физических методов анализа являлся метод БЭТ, используемый для определения удельной площади поверхности изучаемых образцов. Результаты анализа приведены в табл. 1. Видно, что наибольшей площадью поверхности обладал шлам, полученный при 300°C. Кроме всего прочего, было обнаружено, что наличие в пробах $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ придает им магнитные свойства.

В дальнейшем в лаборатории было проведено исследование выявленных закономерностей на реальном объекте – боксита Средне-Тиманского месторождения. Изучалось

Таблица 1. Удельная площадь поверхности образцов шлама, полученных при 300, 500 и 700°C
Table 1. Specific surface area of sludge samples obtained at the temperature of 300, 500 and 700°C

Параметры	Образец		
	300	500	700
Площадь поверхности ($\text{м}^2/\text{г}$)	62,651	6,396	1,982
Микропористость ($\text{м}^2/\text{г}$)	0,106	0,342	0,102
Масса исследуемого образца (г)	1,044	0,998	0,953

варьирование различных параметров процесса на степень извлечения алюминия из бокситов Среднего Тимана и выход красного шлама. Химический анализ использованного для эксперимента боксита представлен в табл. 2.

Ранее проведенный анализ фазового состава показал, что основными минералами боксита Средне-Тиманского месторождения являются следующие: бемит, гематит, диаспор, кварц, рутил, шамозит [14]. На рис. 6 представлены результаты экспериментов, показывающие влияние температуры спекания боксита с каустической щелочью на извлечение глинозема и выход красного шлама, полученного после выщелачивания данного спека.

Установлено, что наибольшее извлечение глинозема наблюдается при температуре спекания 300°C, бемит переходит в алюминат натрия практически полностью, на что указывает кинетика взаимодействия чистого бемита с каустической щелочью, описанная ранее. Также показано снижение выхода красного шлама при данных параметрах процесса. В результате наилучшей температурой среди изученных была 300°C. Для снижения количества экспериментов был построен план экспериментов в прикладном пакете программ

Таблица 2. Химический состав боксита Среднего Тимана
Table 2. Chemical composition of the Middle Timan bauxite

Содержание компонентов, % масс.							
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	CO ₂	TiO ₂	H ₂ O	μ _{Si}
50,27	24,60	8,31	0,42	0,30	2,90	15,50	6,06

Отношение NaOH к бокситу = 1,0

Температура = 300 °C

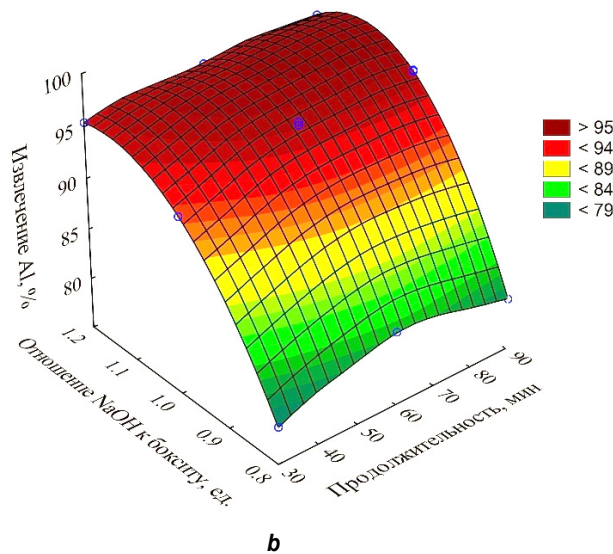
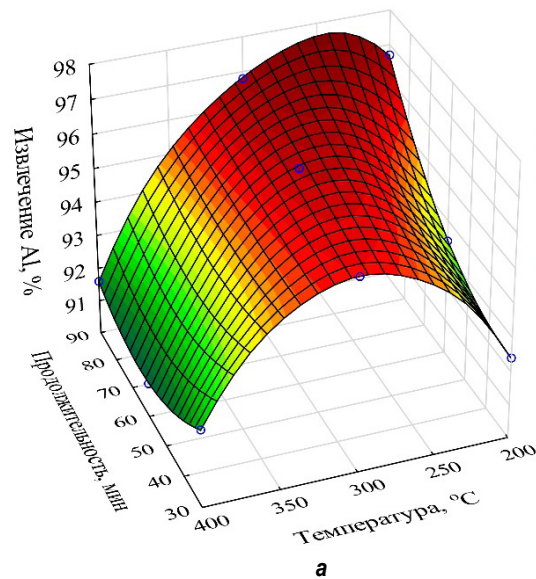


Рис. 7. Зависимость извлечения алюминия от продолжительности и температуры спекания (а), продолжительности и отношения NaOH к бокситу (b)
Fig. 7. Aluminum recovery vs sintering duration and temperature (a), duration and NaOH to bauxite ratio (b)

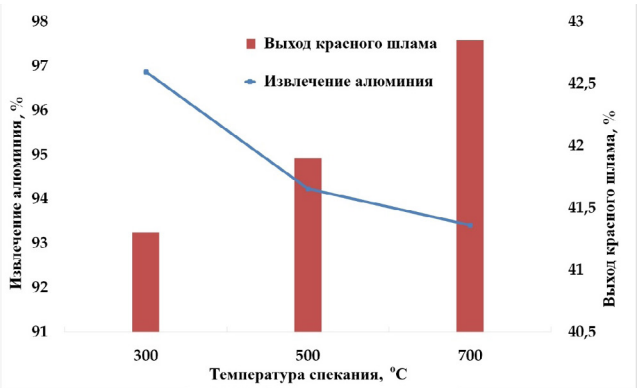


Рис. 6. Влияние температуры спекания боксита со щелочью на извлечение глинозема и выход красного шлама
Fig. 6. Bauxite and alkali sintering temperature vs alumina recovery and red mud yield

Statistica 13. Варьируемыми параметрами являлись температура, продолжительность и массовое отношение NaOH к бокситу. На рис. 7 показаны поверхности отклика, построенные на основе полученных результатов по извлечению Al.

Очевидно, что температура оказывает двоякую роль на извлечение алюминия из раствора (см. рис. 7 а). До 300°C идет увеличение степени извлечения алюминия, затем наблюдается некоторое снижение, что, очевидно,

связано с полным вскрытием всех минералов, включая кремнийсодержащие. В табл. 3 приведен химический состав получаемого красного шлама. Прочие фиксированные параметры составляли продолжительность спекания 60 мин, массовое отношение NaOH к бокситу 1,0. Также в табл. 3 приведен химический состав красного шлама, получаемого в промышленности.

Повышение массового отношения боксита к щелочи также оказывает значительное влияние на степень извлечения алюминия при последующем выщелачивании спека, что связано с увеличением контактной поверхности и получением более высокомолекулярных алюминатных растворов.

Затем были исследованы физические свойства красных шламов (табл. 4), полученных при разных температурах спекания в сравнении с существующими отвальными красными шламами.

В результате самая высокая намагниченность и удельная площадь поверхности были получены при спекании боксита со щелочью при низких температурах. На рис. 2 показаны микрофотографии данных шламов, где видно, что они также состоят из частиц размером меньше 1 мкм. При спекании гематита без прочих примесей при 500°C удельная площадь поверхности твердого продукта составила лишь 6,0 м²/г.

В дальнейшем были проведены исследования на красном шламе, полученном при спекании боксита с каустической щелочью при T = 300°C (см. табл. 3), который затем был

подвергнут выщелачиванию водой при 80°C в течение 30 мин. Содержание в нем Na₂O составило 0,78%. Кроме того, было подтверждено наличие в данном шламе повышенного содержания редкоземельных элементов, мг/кг: Sc₂O₃ = 212; CeO₂ = 862; La₂O₃ = 365; Nd₂O₃ = 322; Nb₂O₅ = 241; Y₂O₃ = 196.

Физико-химические методы анализа показали, что практически все железо в данном продукте представлено маггемитом γ-Fe₂O₃, кроме того, было сделано предположение, что все минералы редкоземельных элементов, присутствующие в бокситовом сырье, после низкотемпературного спекания и выщелачивания спека становятся более легкодоступными для дальнейшего их извлечения с использованием слабокислотной обработки при pH = 3,5 растворами серной кислоты [15]. Извлечение их в раствор составило 80–90%. При нейтрализации полученных растворов щелочью или содой получается концентрат РЗМ, который можно отправить на поэтапное извлечение из него нужных редкоземельных металлов существующими способами [16–20].

Анализируя полученные результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

– исследованы физико-химические свойства твердых остатков, полученных после водного выщелачивания спека гематита с каустической щелочью при 300, 500 и 700°C, что позволило определить наличие в конечном продукте в качестве основной фазы при 300 и 500°C маггемита, а при 700°C – оксида железа (III);

– установлено, что процесс растворения

Таблица 3. Химический состав красного шлама, полученного с использованием различных технологий
Table 3. Chemical composition of red mud obtained via different technologies

Тип красного шлама	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	ППП*
Способ Байера	5,16	13,3	53,21	12,04	5,48	5,98	4,20
Спекание со щелочью при 300°C	1,53	3,87	67,80	2,93	6,88	1,50	12,84
Спекание со щелочью при 400°C	2,50	7,02	66,83	5,30	6,78	1,48	7,10

*Потери при прокаливании.

Таблица 4. Физические свойства различных видов красного шлама
Table 4. Physical properties of various types of red mud

Красный шлам	Удельная площадь поверхности, м ² /г	Объем пор x10 ⁻³ , см ³ /г	VSM* намагниченность при 10 кОе, эму/г
Способ Байера	22,51	38,70	отсутствует
Спекание со щелочью при 300°C	54,97	76,40	19
Спекание со щелочью при 500°C	51,77	70,60	20
Спекание со щелочью при 700°C	6,40	13,30	отсутствует

*VSM – от англ. vibrating sample magnetometry.

основного глиноземсодержащего минерала – бемита – протекает в кинетической области и протекает менее, чем за 10 мин;

– показана принципиальная возможность переработки бокситового сырья на основе низкотемпературного спекания боксита с каустической щелочью;

– установлено, что наибольшее влияние на степень извлечения алюминия из бокситов при их спекании со щелочью оказывает температура и массовое отношение каустической щелочи к массе боксита;

– также исследование физико-химических характеристик красного шлама, получаемого при спекании бокситов с каустической щелочью, показало, что основной фазой железа является маггемит, представленный наноразмерными частицами, обладающими магнитными свойствами и высокой удельной площадью поверхности (более 50 м²/г), содержание оксида натрия в твердом продукте, полученном при оптимальных условиях, не превышает 1,5%;

– дополнительная обработка данного шлама

водой при температуре 80°C позволяет снизить содержание щелочи до 0,78% и отправить его на слабокислотную обработку серной кислотой с целью получения концентрата РЗМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных опытов низкотемпературного спекания основных компонентов бокситового сырья (бемита и гематита) были проведены исследования предлагаемой технологии на боксите Средне-Тиманского месторождения, изучены свойства полученных красных шламов и выявлено изменение их минералогического состава по сравнению с существующими шламами. Показаны возможность борьбы с выбросами углекислого газа на глиноземных заводах Урала и способ получения высокожелезистых магнитных шламов с повышенным содержанием в них РЗМ. При дальнейшей обработке таких шламов разбавленными растворами кислот редкоземельные элементы легко переходят в раствор, путем нейтрализации которого можно получить концентрат РЗМ.

Список источников

1. Сабирзянов Н.А., Яценко С.П. Гидрохимические способы комплексной переработки бокситов. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2006. 385 с. EDN: QMZSDP.
2. Лавренчук В.Н., Стряпков А.В., Коковин Е.Н. Скандий в бокситах и глинах: монография. Каменск-Уральский: Каменск-Уральская типография, 2004. 291 с.
3. Бибанаева С.А., Сабирзянов Н.А., Скачков В.М., Чуфаров А.Ю., Суриков В.Т., Лебедева Э.М., Ворсин В.А. Интенсификации процесса автоклавного выщелачивания бокситов различных месторождений // Актуальные вопросы современного материаловедения: матер. VI Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 30 октября 2019 г.). Уфа: Башкирский государственный университет, 2020. С. 61–68. EDN: KLWNYW.
4. Троицкий И.А. Производство глинозема из бокситов. Технологические расчеты. М.: Metallurgy, 1972. 175 с.
5. Еремин Н.И., Наумчик А.Н., Казаков В.Г. Процессы и аппараты глиноземного производства. М.: Metallurgy, 1980. 360 с.
6. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // Resources, Conservation and Recycling. 2006. Vol. 48. Iss. 4. P. 301–314. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003>.
7. Logonova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54. Iss. 2. P. 143–147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>.
8. Куличенко А. Углеродный след: главный экологический вопрос человечества // Русское горно-химическое общество. Режим доступа: <https://brucite.plus/articles/uglerodnyj-sled/> (дата обращения: 30.09.2023).
9. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Aluminum production in the times of climate change: the global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2020. Vol. 72. Iss. 1. P. 296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>.
10. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Reducing the carbon footprint: aluminium smelting with changing energy systems and the risk of carbon leakage // Minerals, Metals and Materials Series / eds. A. Tomsett. Cham: Springer, 2020. P. 726–734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_98.
11. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. Iss. 3. P. 848–857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
12. Ткачев И., Котченко К. Россия заплатит ЕС €1,1 млрд в год углеродного налога // РБК. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/economics/26/07/2021/60fac8469a7947d1f4871b47> (дата обращения: 30.09.2023).
13. Gillingham K., Stock J.H. The cost of reducing greenhouse gas emissions // Journal of Economic Perspectives. 2018. Vol. 32. Iss. 4. P. 53–72. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53>.

14. Shoppert A., Loginova I., Rogozhnikov D., Karimov K., Chaikin L. Increased as adsorption on maghemite-containing red mud prepared by the alkali fusion-leaching method // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 1. <https://doi.org/10.3390/min9010060>.
15. Shoppert A., Loginova I., Napol'skikh J., Kyrchikov A., Chaikin L., Rogozhnikov D., Valeev D. Selective scandium (Sc) extraction from bauxite residue (red mud) obtained by alkali fusion-leaching method // *Processing and Characterization of Mineral Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 2. P. 433. <https://doi.org/10.3390/ma15020433>.
16. Zhaobo Liu, Li Hongxu, Jing Qiankun, Zhang Mingming. Recovery of scandium from leachate of sulfation-roasted Bayer red mud by liquid-liquid extraction // *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2021. Vol. 69. Iss. 11. P. 2373–2378. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2518-0>.
17. Thomas H.C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system // *Journal of the American Chemical Society*. 1944. Vol. 66. Iss. 10. P. 1664–1666. <https://doi.org/10.1021/ja01238a017>.
18. Rychkov V.N., Smirnov A.L., Nalivayko K.A., Titova S.M., Kirillov E.V. Kinetics of scandium sorption by phosphorus-containing ion ex-changer purolite D5041 from hydrolysis sulfuric acid from titanium dioxide production // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2174. Iss. 1. P. 020054. <https://doi.org/10.1063/1.5134205>.
19. Bao Shenxu, Hawker W., Vaughan J. Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>.
20. Li Wanyan, Li Zehai, Wang Ning, Gu Hannian. Selective extraction of rare earth elements from red mud using oxalic and sulfuric acids // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 6. P. 108650.

References

1. Sibirzyanov N.A., Yacenko S.P. *Hydrochemical methods of bauxite complex processing*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2006, 386 p. (In Russ.). EDN: QMZSDP.
2. Lavrenchuk V.N., Stryapkov A.V., Kokovin E.N. *Scandium in bauxites and clays*. Kamensk-Uralsky: Kamensk-Uralskaya tipografiya; 2004, 291 p. (In Russ.).
3. Bibanaeva S.A., Sabirzyanov N.A., Skachkov V.M., Chufarov A.Yu., Surikov V.T., Lebedeva E.M., Vorsin V.A. Intensification of pressure leaching of various deposit bauxites. In: *Aktual'nye voprosy sovremennogo materialovedeniya: materialy VI Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Current issues of modern materials science: materials of the 6th International youth scientific and practical conference*. 30 October 2019, Ufa. Ufa: Bashkir State University; 2020, p. 61-68. (In Russ.). EDN: KLWNYW.
4. Troitskiy I.A. *Production of alumina from bauxite. Technological calculations*. Moscow: Metallurgy; 1972, 175 p. (In Russ.).
5. Eremin N.I., Naumchik A.N., Kazakov V.G. *Alumina production processes and apparatus*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 360 p. (In Russ.).
6. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. *Resources, Conservation and Recycling*. 2006;48(4):301-314. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003>.
7. Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(2):143-147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>.
8. Kulichenko A. Carbon footprint: the major environmental issue of humanity. *Russkoe gorno-himicheskoe obshchestvo*. Available from: <https://brucite.plus/articles/uglerodnyj-sled/> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
9. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Aluminum production in the times of climate change: the global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2020;72(1):296-308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>.
10. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Reducing the carbon footprint: aluminium smelting with changing energy systems and the risk of carbon leakage. In: Tomsett A. (eds.). *Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer; 2020, p. 726-734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_98.
11. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(3):848-857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
12. Tkachev I., Kotchenko K. Russia will pay the European Union €1.1 billion per year in carbon tax. *RBK*. Available from: <https://www.rbc.ru/economics/26/07/2021/60fac8469a7947d1f4871b47> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
13. Gillingham K., Stock J.H. The cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Economic Perspectives*. 2018;32(4):53-72. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53>.
14. Shoppert A., Loginova I., Rogozhnikov D., Karimov K., Chaikin L. Increased as adsorption on maghemite-containing red mud prepared by the alkali fusion-leaching method. *Minerals*. 2019;9(1). <https://doi.org/10.3390/min9010060>.
15. Shoppert A., Loginova I., Napol'skikh J., Kyrchikov A., Chaikin L., Rogozhnikov D., Valeev D. Selective scandium (Sc) extraction from bauxite residue (red mud) obtained by alkali fusion-leaching method. *Processing and Characterization of Mineral Materials*. 2022;15(2):433. <https://doi.org/10.3390/ma15020433>.
16. Zhaobo Liu, Li Hongxu, Jing Qiankun, Zhang Mingming. Recovery of scandium from leachate of sulfation-roasted Bayer red mud by liquid-liquid extraction. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2021;69(11):2373-2378. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2518-0>.
17. Thomas H.C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system. *Journal of the American Chemical Society*. 1944;66(10):1664-

1666. <https://doi.org/10.1021/ja01238a017>.

18. Rychkov V.N., Smirnov A.L., Nalivayko K.A., Titova S.M., Kirillov E.V. Kinetics of scandium sorption by phosphorus-containing ion exchanger purolite D5041 from hydrolysis sulfuric acid from titanium dioxide production. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2174(1):020054. <https://doi.org/10.1063/1.5134205>.

19. Bao Shenxu, Hawker W., Vaughan J. Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017;36(1):100-113. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>.

20. Li Wanyan, Li Zehai, Wang Ning, Gu Hannian. Selective extraction of rare earth elements from red mud using oxalic and sulfuric acids. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108650. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108650>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логонова Ирина Викторовна,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Кырчиков Алексей Владимирович,

к.т.н.,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
✉ a.v.kyrchikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5111-5041>

Чайкин Леонид Иванович,

к.т.н.,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
l.i.chaikin@urfu.ru

Напольских Юлия Александровна,

к.т.н.,
инженер I категории кафедры металлургии
цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
julia.napolskikh@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2034-7928>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 19.06.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.10.2023 г.;
принята к публикации 08.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina V. Loginova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Non-ferrous Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Aleksey V. Kyrchikov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Non-ferrous Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ a.v.kyrchikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5111-5041>

Leonid I. Chaikin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Non-ferrous Metals
Metallurgy Department,
Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
l.i.chaikin@urfu.ru

Yulia A. Napolskikh,

Cand. Sci. (Eng.),
1st Category Engineer of the Non-ferrous
Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named after the
first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
julia.napolskikh@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2034-7928>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 19.06.2023;
approved after reviewing 16.10.2023;
accepted for publication 08.11.2023.