

УДК 669.7.018.672  
МРНТИ 53.01.91.  
<https://doi.org/10.31643/2018/6445.12>

Комплексное использование  
минерального сырья. № 3. 2018.

Р. А. АБДУЛВАЛИЕВ<sup>1,2</sup>, Н. К. АХМАДИЕВА<sup>2</sup>, С. В. ГЛАДЫШЕВ<sup>1</sup>, Л. М. ИМАНГАЛИЕВА<sup>2\*</sup>,  
А. И. МАНАПОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан, \*e-mail: leila.imangalieva@mail.ru

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,  
Алматы, Казахстан

## ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЛАВКА МОДИФИЦИРОВАННОГО КРАСНОГО ШЛАМА

Received: 15 July 2018 / Peer reviewed: 08 August 2018 / Accepted: 10 August 2018

**Резюме.** В статье приведены результаты исследований комплексной переработки красного шлама, полученного из высокожелезистых бокситов глиноземного производства методом восстановительной плавки. Красный шлак - техногенный остаток, который содержит полезные компоненты и может быть использован как комплексное сырье для получения чугуна, концентратов редкоземельных элементов (РЗЭ) и диоксида титана. Известные способы переработки красного шлама методом восстановительной плавки не нашли применения из-за невозможности получения шлама с низким содержанием железа. Актуальность проблемы состоит в необходимости решения задачи утилизации красного шлама. В результате проведения исследований разработан способ переработки модифицированного красного шлама методом восстановительной плавки с получением чугуна и обезметалленного шлама, содержащего редкоземельные элементы и диоксид титана. Способ основан на предварительной обработке красного шлама в высокомолекулярном щелочном растворе при температуре 240 – 260 °С и добавлении в пульпу оксида кальция из расчета получения модифицированного красного шлама – гидрогрантового шлама, основным соединением которого является железистый гидрогранат –  $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Восстановительная плавка гидрогрантового шлама позволила получить чугун и после магнитной сепарации – немагнитную фракцию шлама, содержащую 0,22 % железа, что определяет возможность получения качественных концентратов РЗЭ и диоксида титана при гидрометаллургической переработке. Извлечение железа в чугун составило 88,0 %, в магнитную фракцию – 11,9 %, в немагнитную – 0,1 %. Извлечение титана в магнитную фракцию составило 34,3 %, а в немагнитную – 65,7 %. Извлечение РЗЭ в немагнитную фракцию составило 65,7 %.

**Ключевые слова:** высокожелезистые бокситы, красный шлак, железистый гидрогранат, восстановительная плавка, чугун, шлак, редкоземельные элементы, диоксид титана

**Введение.** Казахстан располагает значительными запасами низкокачественного алюминиевого сырья, в том числе железистых бокситов [1]. Крупнейшим месторождением железистых бокситов является Кокталское месторождение Костанайской области. Учитывая наличие в области месторождений угля и достаточных запасов известняка, данный регион может служить базой для организации нового глиноземного производства. Для успешной реализации данного проекта необходима технология, включающая безотходную утилизацию техногенных остатков глиноземного производства – красного шлама. При комплексной переработке низкокачественных бокситов обеспечивается рентабельность производства.

Технология переработки бокситов включает обработку щелочным раствором по традиционному способу Байера с получением алюмощелочного раствора и красного шлама [3, 4].

Красный шлак - техногенный остаток, который содержит полезные компоненты и может быть использован как комплексное сырье, в том числе для получения чугуна, концентратов редкоземельных элементов (РЗЭ) и диоксида титана [5-15].

Известные способы переработки красного шлама методом восстановительной плавки в настоящее время не нашли применение в производстве из-за своих недостатков.

Известны исследования по восстановительной плавке красного шлама ветви Байера для

выделения железа в чугун, а оксида алюминия, натрия и титана в шлак.

Согласно способу переработки красного шлама [16], шлак выщелачивают слабо концентрированной 0,6 М азотной кислотой при комнатной температуре, в результате получена степень извлечения в раствор РЗЭ – 70 %, железа – 2 %. Такое количество железа является очень большим по сравнению с РЗЭ и влияет на качество концентрата при дальнейшем извлечении РЗЭ из раствора. Кроме того, при кислотной обработке красного шлама безвозвратно теряются щелочь и алюминий.

Способ переработки красного шлама [17], включает восстановительную плавку красного шлама на чугун и шлак. После магнитной сепарации из шлака содовыми растворами извлекают гидроксид алюминия. Остаток после содовой обработки шлака – шлак подвергают сернокислотному выщелачиванию. В раствор переходят редкоземельные элементы, а в осадке остается кальций в виде гипса.

Извлечение редкоземельных элементов в сернокислый раствор составляет 90,0 %.

Недостатками способа являются потери щелочи, содержащейся в красном шламе, при восстановительной плавке и низкое качество концентрата РЗЭ, что связано с высоким содержанием железа. При плавке красного шлама зерна железа не располагаются на поверхности шлака, а вкрапливаются в него, в результате чего при магнитной сепарации в немагнитной фракции получено остаточное содержание железа 8-10 %. Необходимое высокое содержание серной кислоты – 2,4 Н в растворе выщелачивания для извлечения РЗЭ привело к высокому содержанию железа в растворе.

В АО «Институт металлургии и обогащения» в течение ряда лет разрабатывается комплексная технология переработки высокожелезистых бокситов [6, 7]. Технология включает переработку красного шлама в высокомолекулярном щелочном растворе при температуре 240-260 °С с добавлением в пульпу оксида кальция из расчета получения модифицированного красного шлама, в котором основным соединением является железистый гидрогранат -  $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , не содержащий в своем составе алюминий и щелочь. Модифицированный красный шлак – гидрогранатовый шлак (ГГШ) – является по существу железо – кальциевым концентратом, с высоким содержанием оксида железа и с минимальным содержанием натриевой щелочи, что придает новому твердому продукту переработки

высокожелезистых бокситов широкие потребительские свойства.

Цель исследования – разработка способа переработки красного шлама методом восстановительной плавки с получением чугуна, концентратов РЗЭ и диоксида титана.

**Экспериментальная часть.** Химический анализ проб выполнен на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно – связанной плазмой Optima 2000 DV (США, Perkin Elmer).

Экспериментальные данные при рентгенофазовых исследованиях получены на аппарате BRUKERD8 ADVANCE на медном излучении при ускоряющем напряжении 36 кВ, токе 25 мА.

Кристаллооптический анализ проб проводили на микроскопе в проходящем и отраженном свете. В проходящем свете пробы исследовали иммерсионным методом под микроскопом МИН-8 при увеличении  $\times 320$ . В отраженном свете в полированных шлифах пробы исследовали с помощью микроскопа Leica (увеличение  $\times 200$  и  $\times 100$ ).

Выщелачивание боксита проводили в растворе содержащем 240 г/дм<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>O с каустическим модулем –  $\alpha_k$  3,0 при температуре 110°; Ж:Т=6:1 и продолжительности процесса 7 ч.

Выщелачивание красного шлама проводили по гидрогранатовой технологии [7] при температуре 240-260 °С, при Ж:Т=4:1, с добавлением оксида кальция в виде известкового молока, из расчета получения  $3\text{CaO}:\text{Fe}_2\text{O}_3$ , в щелочном растворе состава, г/дм<sup>3</sup>: Na<sub>2</sub>O – 285,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14,65; SiO<sub>2</sub> – 0,024.

Восстановительную плавку гидрогранатового шлама на чугун проводили с добавлением древесного угля в количестве 5 % от массы шихты.

Шихту перед плавкой подвергали брикетированию, в качестве связующего использовали патоку в количестве 0,5 %. Брикетирование проводили под избыточным давлением 200 кг/см<sup>2</sup>. Материал после брикетирования просушивали в сушильном шкафу при температуре 350 – 400 °С для удаления влаги, введенной с раствором патоки.

При плавке использовали графитовые тигли, изготовленные из электродного графита, применяемого в алюминиевой промышленности при электролитическом получении алюминия из криолит-глиноземных расплавов.

Нагрев шихты осуществляли в муфельной печи фирмы Noberterm.

Плавку проводили при температурах 1600 –

1650 °С, время выдержки составляло 60 мин.

Магнитную сепарацию шлака восстановительной плавки проводили при напряженности магнитного поля 40 – 60 МТл.

В работе представлены усредненные результаты серии опытов по восстановительной плавке.

**Результаты и их обсуждение.** Для проведения исследований был использован красный шлак, полученный при переработке железистых бокситов Кокतालского месторождения.

Химический состав пробы боксита, мас. %:  $Al_2O_3$  – 35,8;  $SiO_2$  – 5,9;  $Fe_2O_3$  – 30,9;  $TiO_2$  – 3,8;  $\Sigma PЗЭ$  – 0,055.

В результате выщелачивания боксита получили красный шлак состава, мас. %:  $Na_2O$  – 7,33;  $Al_2O_3$  – 10,47;  $SiO_2$  – 11,19;  $Fe_2O_3$  – 46,95;  $TiO_2$  – 7,9;  $CaO$  – 6,33;  $\Sigma PЗЭ$  – 0,055.

Фазовый состав красного шлака по данным рентгенофазового анализа приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Фазовый состав красного шлака

Наименование	Формула	%
Гематит	$Fe_2O_3$	47,1
Гидроалюмо-силикат натрия	$Na_8(AlSiO_4)_6(OH)_2 \cdot 4H_2O$	34,9
Анатаз	$TiO_2$	8,0

Из приведенного фазового состава красного шлака видно, что кремнезем связан в гидроалюмосиликат натрия. Согласно ранее проведенным исследованиям [16, 17] восстановительная плавка красного шлака приводит к потерям содержащейся в нем щелочи и высокому содержанию железа в шлаке.

В проведенных в настоящей работе исследованиях перед восстановительной плавкой красный шлак был модифицирован в гидрогранатовый при щелочной обработке с добавлением  $CaO$ .

Химический состав гидрогранатового шлака следующий, мас. %:  $Na_2O$  – 0,32;  $Al_2O_3$  – 3,8;  $SiO_2$  – 9,2;  $Fe_2O_3$  – 41,95;  $TiO_2$  – 6,7;  $CaO$  – 23,3;  $CO_2$  – 0,03;  $\Sigma PЗЭ$  – 0,053;  $H_2O_{кр}$  – 7,04; прочие – 7,607; плотность – 3168,13 кг/м<sup>3</sup>.

Фазовый состав гидрогранатового шлака по данным рентгенофазового анализа приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Фазовый состав гидрогранатового шлака

Наименование	Формула	%
Гематит	$Fe_2O_3$	27,4
Андрадит	$Ca_3(Fe_{0,87}Al_{0,13})_2(SiO_4)_{1,65}(OH)_{5,4}$	46,3
Катоит	$Ca_3Al_2(O_4H_{4,3})$	9,7
Магнетит	$Fe_3O_4$	6,0

Из фазового состава гидрогранатового шлака следует, что в результате проведенной обработки гидроалюмосиликат натрия разложился с переходом в раствор щелочи и основной части алюминия, а кремнезем образовал с  $CaO$  и  $Fe_2O_3$  железокальциевый гидрогранат.

В результате проведенной серии испытаний по восстановительной плавке полученного модифицированного красного шлака были получены чугун и саморассыпающийся шлак. Выход чугуна составил 35,0 %, шлака 37,5 %.

Химический состав усредненной пробы чугуна, мас. %: 95,3 Fe; 1,3 Si; 0,8 Ti; 0,52 Al; 0,001 P; 2,2 C; 0,2 Cr; 0,101 Mn; 0,043 Ni; 0,052 Cu.

Кристаллооптический анализ показал, что чугун в отраженном свете в полированном шлифе – белого цвета (рисунок). Микротрещины в чугуне имеют толщину от 0,001 до 0,02 мм, заполнены углеродистым веществом темно-серого цвета (рисунок 1).



Рисунок 1 – Чугун с включениями и микротрещинами

Результаты рентгенофазового анализа чугуна приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Фазовый состав чугуна

Наименование	Формула	%
Железо	Fe	95,3
Графит	C	3,1

Химический состав усредненной пробы шлака плавки чугуна следующий, мас %: 7,6  $Al_2O_3$ ; 23,0  $SiO_2$ ; 20,9  $CaO$ ; 5,3  $Fe$ ; 10,0  $TiO_2$ ; 0,32  $Na_2O$ ; 0,061  $\Sigma P_3Э$ . Извлечение  $P_3Э$  в шлак составило 43,4 %.

В результате магнитной сепарации шлак разделили на магнитную и немагнитную фракцию. Выход магнитной фракции составил 34,0 %, немагнитной 66,0 %.

Химический состав магнитной фракции следующий, мас %: 6,6  $Al_2O_3$ ; 14,57  $SiO_2$ ; 16,13  $CaO$ ; 37,56  $Fe$ ; 10,1  $TiO_2$ ; 0,32  $Na_2O$ ; 0,01  $\Sigma P_3Э$ ; п.п. 14,71.

Химический состав немагнитной фракции следующий, мас %: 21,1  $Al_2O_3$ ; 20,3  $SiO_2$ ; 45,8  $CaO$ ; 0,22  $Fe$ ; 9,8  $TiO_2$ ; 0,3  $Na_2O$ ; 0,055  $\Sigma P_3Э$ ; п.п. 2,425. Соотношение  $Fe : P_3Э$  равно 4.

В результате расчетов получено, что извлечение железа в чугун составило 88,0 %, в магнитную фракцию 11,9 %, в немагнитную фракцию – 0,1 %. Извлечение титана в магнитную фракцию составило 34,3 %, а в немагнитную – 65,7 %. Извлечение  $P_3Э$  в немагнитную фракцию составило 65,7 %.

Результаты рентгенофазового анализа немагнитной фракции шлака приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Фазовый состав немагнитной фракции шлака

Наименование	Формула	%
Трехкальциевый алюмосиликат	$3CaO \cdot Al_2O_3$	35,9
Ларнит	$Ca_2SiO_4$	26,1
Алюминат кальция	$Ca_3Al_2O_6$	17,5
Шарьгинит	$Ca_3TiFe_2O_8$	7,4
Перовскит	$CaTiO_3$	6,8
Силикат кальция	$Ca_3SiO_5$	3,5
Акерманит	$Ca_2Mg(Si_2O_7)$	2,8

Таким образом, после магнитной сепарации шлака чугуна получена фракция с содержанием железа значительно меньшим, чем в шлаке при прямой восстановительной плавке красного шлама в работе [17]. Этот результат связан с тем, что в результате щелочной обработки красного шлама в присутствии  $CaO$ , кремнезем связывается в железистый гидрогранат, из которого железо при плавке переходит в чугун, а кремнезем в виде двухкальциевого силиката – в шлак. Вкрапленное в двухкальциевый силикат железо находится на поверхности и легко отделяется магнитной сепарацией. При восстановительной плавке красного шлама [17] корольки железа входят в силикатную структуру шлака, и располагаются

внутри, в результате немагнитная фракция такого шлака содержит 8-10 %  $Fe$ . При восстановительной плавке модифицированного красного шлама получено содержание железа в немагнитной фракции шлака в 50 раз меньше.

После каждого опыта полученную магнитную фракцию шлака направляли на плавку следующей партии чугуна, в результате этого содержащиеся в ней редкоземельные элементы и диоксид титана возвращались в переработку.

Наработанная немагнитная фракция шлака была использована при гидрометаллургической переработке с получением концентратов  $P_3Э$  и диоксида титана.

**Выводы.** Разработан способ переработки красного шлама методом восстановительной плавки с получением чугуна и шлака, содержащего редкоземельные элементы и диоксид титана. Способ основан на предварительной обработке красного шлама в высокомолекулярном щелочном растворе при температуре 240 – 260 °С при добавлении в пульпу оксида кальция из расчета получения модифицированного красного шлама – гидрогранатового шлама, основным соединением которого является железистый гидрогранат –  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ .

Восстановительная плавка модифицированного красного шлама позволила получить чугун и после магнитной сепарации немагнитную фракцию шлака, содержащего 0,22 % железа, что определяет возможность получения качественных концентратов  $P_3Э$  и диоксида титана при гидрометаллургической переработке.

*Работа выполнена при финансовой поддержке КН МОН РК по гранту AP05130549 «Разработка технологии комплексной переработки красного шлама с модификацией его в бесщелочную форму и получением востребованных промышленных продуктов»*

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Смирнов С. Редкие металлы и земли дают горно-металлургическому комплексу редкий шанс // Международный деловой журнал Kazakhstan. Редакционный обзор. – 2011. – № 3. – С. 56-59.
- 2 Кирпаль Г.Р. Месторождения бокситов Казахстана. ПГУ им. С. Торайгырова. – М.: Недра. – 1976. – 205 с.
- 3 Akcil A., Akhmediyeva N.K., Abdulvaliyev R.A., Abhilash & Pratima Meshram. Overview on Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Red Mud: Focus on Scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy

Review. – 2018. – V. 39, N 3, – P. 145-151. DOI:10.1080/08827508.2017.1288116.

4 Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М. *Металлургия алюминия*. – Новосибирск: Наука, 1999. – 438 с.

5 Лайнер А.И. *Производство глинозема*. – М: Metallurgia, 1978. – 341с.

6 Ахмадиева Н.К., Абдулвалиев Р.А., Акчил А., Гладышев С.В., Кульдеев Е.И. Красный шлам глиноземного производства как потенциальный источник для получения редкоземельных элементов. Обзор. // *Комплексное использование минерального сырья*. – 2016. – № 4. – С. 98-104.

7 Пат. 30113 РК. Способ переработки низкокачественных железистых бокситов по Байер-гидрогранатовой технологии / Бектурганов Н.С., Мылтыкбаева Л.А., Абишева З.С., Абдулвалиев Р.А., Тастанов Е.А., Гладышев С.В.; опубл. 15.08.2016, Бюл. № 9.

8 Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA // *Separation and purification technology*. – 2013. – № 108. – P. 96-102. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.02.001.

9 Panagiotis D., Efthymios B., Dimitrios P., Ioannis P. Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid // *Hydrometallurgy*. – 2016. – V. 164, – P. 125-135. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.06.012

10 Yang X., Zhang J., Fang X. Rare earth elements recycling from waste nickel-metal hydride batteries // *Journal of Hazardous materials*. – 2014. – № 279. – P. 384-388. DOI:10.1016/j.jhazmat.2014.07.027.

11 Anisonyan K. G., Kopyev D. Yu., Goncharov K. V., Sadykhov G. B. An investigation of a single-stage red mud reducing roasting process with the cast iron and aluminate slag production // *Non-ferrous Metals*. – 2018. – V. 1. – P. 26–31. DOI: 10.17580/nfm.2018.01.04.

12 Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven T.V. Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud) // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2016, № 2 (4). – P. 365-386. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2.

13 Andrew P. Abbott, Gero Frisch, Jennifer Hartley, Karl S. Ryder. Processing of metals and metal oxides using ionic liquids // *Green Chemistry*. – 2011. – № 13(3). – P. 471–481. DOI: 10.1039/c0gc00716a.

14 Tian G.-c., Li J., Hua Y.-x.. Application of ionic liquids in hydrometallurgy of nonferrous metals // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2010. – № 20(3). – P. 513–520. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60171-0.

15 Liu Y. Naidu R., Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals // *Waste Management*. – 2014. – № 34(12). – P. 2662–2673. doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003.

16 Lambrini V.T., Ochsenkuhn-Petropoulou M. Th., Mendrinos L.N. Investigation of the separation of scandium and rare earth elements from red mud by use of reversed-phase HPLC // *Analytical and Bionalytical Chemistry*. – 2004. – № 379. – P. 796-802.

17 Добош Д., Замбо Я, Вишняковский Л. Исследования по использованию красного шлама Байеровского процесса для получения железа и алюминия // *Цветные металлы*. – 1964. – № 2. – С. 36-40.

## REFERENCES

1 Smirnov S. *Redkie metally i zemli dayut gorno-metallurgicheskomu kompleksu redkij shans. Redaktsionnyj obzor* (Rare metals and earths give the mining and metallurgical complex a rare chance. Editorial review). *Mezhdunarod. delovoj zhurn. Kazakhstan. = International business journal Kazakhstan*. **2011**. 3, 56-59. (in Russ.)

2 Kirpal' G.R. *Mestorozhdeniya boksitov Kazakhstana* (Deposits of bauxite of Kazakhstan. S. Toraiyrov's PSUiversity) Moscow: Nedra. **1976**. 205. (in Russ.)

3 Akcil A., Akhmediyeva N., Abdulvaliyev R., Meshram A., Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: focus on scandium. *Mineral Processing and Extractive metallurgy review*. **2018**. 39, 3. P. 145-151. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>. (in Eng.)

4 Borisoglebskij Yu.V., Galevskij G.V., Kulagin N.M. *Metallurgiya alyuminiya*. (Metallurgy of aluminum). Novosibirsk: Nauka, **1999**. 438. (in Russ.)

5 Lajner A.I. *Proizvodstvo glinozema*. (Alumina production). Moscow: Metallurgy. **1978**. 341. (in Russ.)

6 Akhmediyeva N.K., Abdulvaliyev R.A., Akchil A., Gladyshev S.V., Kul'deyev Ye.I. *Krasnyj shlam glinezemnogo proizvodstva kak potentsial'nyj istochnik dlya polucheniya redkozemel'nykh ehlementov. Obzor* (Red mud of alumina production as a potential source for obtaining rare-earth elements. Review.). *Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya = Complex Use of Mineral Resources*. 2016. 4, 98-104. (in Russ.)

7 Пат. 30113 РК. *Sposob pererabotki nizkokachestvennykh zhelezistykh boksitov po Bajergidrogranatovoj tekhnologij* (Method for processing low-quality ferruginous bauxites according to Bayer-hydrogarnate technology) Bekturганov N.S., Myltykbayeva L.A., Abisheva Z.S., Abdulvaliyev R.A., Tastanov Ye.A., Gladyshev S.V.; publ. 15.08.2016. 9. (in Russ.)

18 Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. *Separation and purification technology*. **2013**. 108, 96-102. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.02.001. (in Eng.)

9 Panagiotis D., Efthymios B., Dimitrios P., Ioannis P. Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid. *Hydrometallurgy*. **2016**. 164, 125-135. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.06.012 (in Eng.)

10 Yang X., Zhang J., Fang X. Rare earth elements recycling from waste nickel-metal hydride batteries. *Journal of Hazardous materials*. 2014. 279, 384-388. DOI:10.1016/j.jhazmat.2014.07.027. (in Eng.)

11 Anisonyan K. G., Kopyev D. Yu., Goncharov K. V., Sadykhov G. B. An investigation of a single-stage red mud reducing roasting process with the cast iron and aluminate slag

production. *Non-ferrous Metals*. **2018**. 1. 26–31. DOI: 10.17580/nfm.2018.01.04. (in Eng.)

12 Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven T.V. Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud). *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016 .2 (4). 365-386. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2. (in Eng.)

13 Andrew P. Abbott, Gero Frisch, Jennifer Hartley, Karl S. Ryder. Processing of metals and metal oxides using ionic liquids. *Green Chemistry*. **2011**. 13(3), 471–481. DOI: 10.1039/c0gc00716a. (in Eng.)

14 Tian, G.-c., J. Li, Y.-x. Hua. Application of ionic liquids in hydrometallurgy of nonferrous metals. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. **2010**. 20(3), 513–520. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60171-0. (in Eng)

15 Liu Y., Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. *Waste Management*. **2014**. 34(12), 2662–2673. doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003. (in Eng.)

16 Lambrini V.T., Ochsenkuhn-Petropoulou M. Th., Mendrinou L.N. Investigation of the separation of scandium and rare earth elements from red mud by use of reversed-phase HPLC. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. **2004**. 379, 796-802. (in Eng.)

17 Dobosh D., Zambo YA, Vishn'ovskij L. *Issledovaniya po ispol'zovaniyu krasnogo shlama Bajerovskogo protsessa dlya polucheniya zheleza i alyuminiya* (Studies on the use of red mud of the Bayer process for the production of iron and aluminum). *Tsvetnyye metally = Non-ferrous Metals*. **1964**. 2, 36-40. (in Russ.)214.

### ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада алюминий тотығы өндірісінің жоғары темірлі бокситтерін тотықтыра балқыту әдісімен алынған қызыл шламды кешенді өңдеу зерттеулерінің нәтижелері көрсетілген. Қызыл шлам – шойын, сирек кездесетін жер элементтерінің (СЖЭ) концентраттарын және титан диоксидін өндіру үшін кешенді шикізат ретінде пайдалануға болатын, құрамында пайдалы компоненттері бар техногендік қалдық. Қызыл шламды тотықтыра балқыту арқылы өңдеудің белгілі әдістері төмен темір құрамымен кожды алу мүмкіндігі болмағандықтан қолдануды таппады. Қызыл шламды қайта өңдеу мәселесін шешудің нақты қажеттілігі зерттеуге негіз болды. Зерттеу нәтижесінде құрамында сирек кездесетін жер элементтері мен титан диоксиді бар кожды және шойын ала отырып қызыл шламды тотықтыра балқыту арқылы қайта өңдеу әдісі әзірленді. Бұл әдіс негізгі қоспасы темірлі гидрогранат -  $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  болатын модифицирленген қызыл шламды – гидрогранатты шламды алу есебінен кальций тотығын пульпаға қосу арқылы, жоғарымодулді сілтілі емес ерітіндіде 240 – 260 °С температурада қызыл шламды алдын-ала өңдеуге негізделген. Гидрогранатты шламды тотықтыра балқыту шойын және магнитті сепарациядан кейін құрамында 0,22 % темір бар кождың магнитті емес фракциясын алуға мүмкіндік берді, осыдан СЖЭ сапалы концентраттарын және титан диоксидін гидрометаллургиялық қайта өңдеу арқылы алуға болатыны анықталды. Темірдің шойынға өтуі 88,0 %, магнитті фракцияға 11,9 %, магнитті емес фракцияға 0,1 % құрады. Титанның магнитті фракцияға өтуі 34,3 %, магнитті емес фракцияға 65,7% құрады. СЖЭ магнитті емес фракцияға өтуі 65,7 % құрады.

**Түйін сөздер:** жоғарытемірлі боксит, қызыл шлам, темірлі гидрогранат, тотықтыра балқыту, шойын, кожды, сирек жер элементтері, титан диоксиді.

### ABSTRACT

The article presents the results of investigations of complex processing of red mud obtained from high-alumina bauxites of alumina production by the smelting reduction method. Red mud is a production waste that contains useful components and can be used as a complex raw material for the production of pig iron, rare earth element (REE) concentrates and titanium dioxide. Known methods of red mud processing by the smelting reduction method have not found application because of the impossibility of obtaining slag with low iron content. The urgency of the problem solved by the research is in the need of ways for red mud recycling. As a result, a method for processing the modified red mud by the smelting reduction was developed to produce cast iron and an oxide-free slag containing rare earth elements and titanium dioxide. The method consists in the preliminary treatment of red mud in a high-modulus alkaline solution at a temperature of 240-260 °C with the addition of calcium oxide to the pulp from the calculation for obtaining a modified red mud – a hydrogarnete slurry whose main compound is the ferrous garnet- $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Reducing melting of the hydrogarnete slurry has made it possible to produce cast iron, and after magnetic separation – a nonmagnetic slag fraction containing 0.22 % of iron, which determines the possibility of obtaining high-quality REE concentrates and titanium dioxide in hydrometallurgical processing. The extraction of iron into cast iron is 88.0 %, into the magnetic fraction – 11.9 %, into the non-magnetic fraction – 0.1 %. The extraction of titanium into the magnetic fraction was 34.3 %, and in the nonmagnetic fraction was 65.7 %. The recovery of REE into the nonmagnetic fraction was 65.7 %.

**Key words:** high-iron bauxite, red mud, ferruginous hydrogarnete, reduction melting, cast iron, slag, rare earth elements, titanium dioxide

Поступила 15.07.2018