



Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами

© А.А. Халифа*, В.Ю. Бажин*, М.Э.-М. Х. Шалаби** А. Абдельмонеим***, М. Омран***

*Санкт Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет

***Университет Оулу, г. Оулу, Финляндия

Резюме: Целью работы явилось изучение влияния микроволновой обработки брикетов, состоящих из красного шлама с содержанием более 48% Fe, на процессы восстановления железа при различных условиях термообработки. Объектом исследований явились образцы красного шлама, образующегося при получении глинозема из бокситов на Уральском алюминиевом заводе. Исследование химического состава образцов шлама проводили с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Состав исходного шлама и полученных агломератов после обработки в микроволновой и муфельной печах изучали рентгеноструктурным методом. Фазовые переходы и структурные изменения в ходе нагрева образцов исследовали при помощи сканирующей электронной микроскопии. Экспериментальные брикеты, состоящие из красного шлама и древесного угля, подвергались обработке при 850°C и 1000°C в микроволновой печи (с частотой 2,45 ГГц и мощностью 900 В). Для сравнения брикеты аналогичного состава термообработывались в муфельной печи при тех же условиях. Установлено, что при микроволновом нагреве до 1000°C в течение 10 мин гематит полностью восстанавливается до металлического железа при добавлении вюстита. Анализ микроструктуры образцов после микроволновой обработки показал, что частицы металлического железа в образующихся окатышах-агломератах имеют больший размер, чем в образцах после традиционного термонагрева в муфельной печи. Металлизированные фазы восстановленного железа в конце термообработки в микроволновой печи создают устойчивый прочный каркас агломератов. Научно обоснованные параметры процесса могут стать основой создания технологии переработки красного шлама, являющегося технологичным сырьем. Полученные высокопрочные окатыши из красного шлама с содержанием восстановленного железа (до 85%) могут стать альтернативным шихтовым материалом для черной металлургии. Внедрение предлагаемой технологии переработки красного шлама в окатыши-агломераты, востребованной в различных отраслях промышленности, позволит снизить экологическую нагрузку на производственные территории глиноземного производства.

Ключевые слова: красный шлам, микроволновое излучение, древесный уголь, гематит, карботермическое восстановление

Благодарности: Исследовательской металлургической группе технологического факультета Университет Оулу (Финляндия) и Министерству науки и культуры (Египет) за финансовую поддержку на выполнение данной исследовательской работы.

Для цитирования: Халифа А.А., Бажин В.Ю., Шалаби М.Э.-М.Х., Абдельмонеим А., Омран М. Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 264–279. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-264-279>

Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment

Ahmed A. Khalifa*, Vladimir Yu. Bazhin*, Mohammed E.-M.H. Shalabi**,
Ahmed Abdelmoneim***, Mamdouh Omran***

*St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

**Central Metallurgical Research Institute, Cairo, Egypt

***University of Oulu, Oulu, Finland

Abstract: In this work, we studied the effect of microwave treatment of red mud briquettes containing more than 48% of Fe on the process of iron reduction under various conditions of heat treatment. Research samples were collected from

red mud formed during the production of alumina from bauxite at the Ural Aluminum Smelter. The chemical composition of mud samples was examined by X-ray fluorescence analysis. The composition of initial mud and that of agglomerates obtained after treatment in microwave and muffle furnaces was studied using the X-ray diffraction method. Phase transitions and structural changes occurring under the effect of heating were studied by scanning electron microscopy. The experimental briquettes comprising red mud and charcoal were treated at 850°C and 1000°C in a microwave furnace (under the frequency of 2.45 GHz and the power of 900 W). For reference, briquettes of analogous composition were heat-treated in a muffle furnace under the same conditions. It was found that, under the conditions of microwave heating to 1000°C for 10 min, hematite is completely reduced to metallic iron after the addition of wustite. An analysis of the microstructure of the samples after microwave treatment showed that the particles of metallic iron in the as-obtained pellet-agglomerates have a larger size than in those after conventional thermal heating in a muffle furnace. The metallized phases of reduced iron at the end of heat treatment in a microwave furnace create a stable durable body of agglomerates. The evidence-based parameters of the process can become a basis for designing a technology for recycling such an industrial material as red mud. The obtained high-strength pellets from red mud with a high content of reduced iron (up to 85%) may be used as an alternative charge material for ferrous metallurgy. The proposed technology for recycling red mud into pellet-agglomerates can be applied in various industries to reduce environmental impact on the production areas of alumina plants.

Keywords: red mud, microwave radiation, charcoal, hematite, carbothermic reduction

Acknowledgements: we are grateful to the Process Metallurgy Research Group of the Technology Faculty of the University of Oulu (Finland) and the Cultural Affairs and Mission Sector (Egypt) for their financial support for performing the present research work.

For citation: Khalifa AA, Bazhin VYu, Shalabi E-MH, Abdelmoneim A, Omran M. Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):264–279. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-264-279>

ВВЕДЕНИЕ

Красный шлам (КШ), получаемый в глиноземном производстве по технологии Байера, представляет собой техногенное сырье с различным содержанием оксидов и сложных многокомпонентных соединений, включающих в себя более 40 различных элементов [1–5]. На каждую 1 т произведенного глинозема образуется ≈0,8–0,9 т КШ. По оценке специалистов и технологов, в мире ежегодно образуется более 120 млн т этих отходов [6]. На российских предприятиях ОК «РУСАЛ», находящихся на Урале (Богословский алюминиевый завод (БАЗ) и Уральский алюминиевый завод (УАЗ)), образуется ≈ 5–8 т КШ, и в настоящее время ≈ 600 млн т уже хранится на открытых шламовых полях [7], в том числе в г. Бокситогорск (Ленинградская обл.) и г. Краснотурьинск (Свердловская обл.) в виде государственного сырьевого актива.

Большой объем шламовых полей, высокая щелочность шламов (рН = 10–13) и проблемы с хранением их в дамбах представляют собой техногенную опасность и влияют на загрязнение окружающей среды в целом [3, 8, 9]. Такой объем отходов 1 категории в России, а также в тех странах, где имеются

бокситы (Бразилия, Ямайка, Гвинея, Австралия, Германия, Франция), при переработке которых образуются огромные техногенные хранилища, по-прежнему является одной из самых серьезных мировых проблем для устойчивого развития и горноперерабатывающей и металлургической промышленности [10, 11].

В течение многих лет специалисты алюминиевой промышленности стремились снизить негативное воздействие на окружающую среду образующегося КШ. Существует множество технических и технологических решений по переработке КШ в продукцию различного назначения, но они не внедрены в производство, что способствовало бы уменьшению объемов хранения отходов [9, 12, 13]. Так, некоторые полигоны и шламовые поля находятся в состоянии консервации более 50 лет, и при этом под воздействием внешней среды и осадков изменяется химический состав отходов. Часть соединений попадает в грунтовые и подземные воды, а некоторые испаряются с поверхности. Несмотря на это, содержание железосодержащих фаз даже на старых хранилищах остается на уровне 40–60% [6, 14]. Принимая во внимание эти глобальные эколо-

гические опасности и высокий уровень затрат на долгосрочное хранение, необходимы разработки технологий переработки КШ в различную продукцию или шихтовые материалы для черной металлургии [15].

Высокое содержание оксидов железа в КШ, наряду с группой редкоземельных элементов, может представлять интерес для комплексной переработки данного техногенного сырья производства глинозема [8]. Кроме этого, в производстве чугуна и стали наблюдаются тенденции утилизации более дешевых топливных отходов и железосодержащих материалов и использовании их в качестве оборотного шихтового сырья [16–18]. Существует несколько апробированных технологий для извлечения железа из красного шлама [17, 19–26]: высокоинтенсивная магнитная сепарация, контролируемое газовое восстановление водородом, карботермическое восстановление, восстановительное спекание с солями натрия при высокой температуре, плавка в плазменном реакторе с удлиненной дугой, выщелачивание щавелевой кислотой и др.

Традиционные методы обработки материалов, основанные на выделении тепла экзотермических реакций, в значительной степени зависят от эффективной теплопередачи между ее источниками при взаимодействии с перерабатываемыми материалами [27].

Таким образом, проведенный анализ показал, что технологические ограничения традиционных термических методов требуют разработки новых технологий для эффективной переработки КШ. В то же время любой инновационный процесс должен быть достаточно быстрым и эффективным, чтобы удовлетворять требованиям низкой себестоимости и малых энергозатрат. Технологии микроволновой обработки материалов – одно из таких решений, которое предлагает значительную экономию времени и, следовательно, является рентабельным. Кроме этого, такие методы являются экологически безопасными. Данные технологии в металлургии носят междисциплинарный характер, применяются сравнительно недавно и могут быть успешно реализованы для различных материалов [27–35].

В 2015 г. С. Сингх, Д. Гупта, В. Жаин, А.К. Шарма в своей работе [27] представили состояние и тенденции микроволновой обработки материалов в целом, а Агравал [36] описал последние достижения в области обработки материалов с использованием микроволнового воздействия более подробно. Авторы обратили внимание на возможность реализации этих процессов во время плавки, так как при использовании микроволновой обработки выбросы CO_2 можно сократить на 50% по сравнению с традиционными способами.

Как правило, при нагреве процесс начинается с восстановления гематита до магнетита, затем магнетит восстанавливается до вюстита, и в результате до металлического железа. Известны реакции [37], которые происходят на каждом этапе фазового перехода:

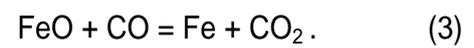


Диаграмма Эллингема [38], показанная на рис. 1, представляет собой зависимость между изменениями стандартной свободной энергии Гиббса при образовании различных оксидов и температурой. Эта диаграмма полезна для сравнения степени устойчивости различных оксидов при определении рациональных температурных режимов разрабатываемой технологии. Очевидно, что оксиды железа постепенно восстанавливаются до гематита, магнетита, вюстита и металлического железа.

В последнее время многие исследователи изучали процесс микроволнового нагрева как альтернативу переработке различных промышленных отходов (окалина, шлак, пыль, шлам и т.д.) с целью извлечения полезных элементов (Fe, Zn, Al, Mg и редкоземельных металлов) [16, 17]. Поэтому в некоторых исследованиях изучается восстановление железа из отходов с помощью прямого микроволнового нагрева порошкового материала. Например, М. Омран, Т. Фабритиус и другие исследователи [32] анализировали

влияние микроволн на переработку шлаков доменных печей без добавления восстановителя с использованием нагрева с частотой волн 2,45 ГГц при мощности 900 Вт при различной продолжительности воздействия. По мнению авторов, гематит полностью восстанавливается до металлического железа. Исследование также подтвердило, что материалы с железосодержащими фазами можно обрабатывать и перерабатывать с помощью микроволнового нагрева с получением агломератов.

Стоит также упомянуть недавний научный отчет С. Агравали и его соавторов [17], в котором изучалась система «красный шлам – древесный уголь 10 масс. %» в режиме микроволнового восстановления в течение 50 мин при 1000°C. Определены оптимальные условия восстановления железосодержащих фаз, которые при 850–870°C составляли 800 Вт и 2,45 ГГц при продолжительности выдержки 30 мин. В результате на выходе получали обогащенный железом концентрат,

содержащий магнетит в качестве основной железосодержащей фазы с содержанием железа 46,5 масс. %. Степень извлечения железа составила 94,3%. Таким образом, данный подход может быть использован в альтернативных технологиях производства чугуна.

Целью экспериментов явилось изучение роли увеличения скорости реакции сверхвысокочастотной обработки и исследования эффективного восстановления красного шлама с помощью микроволнового нагрева. Химический состав полученных с использованием микроволнового нагрева агломератов был проанализирован с помощью рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии (SEM от англ. «scanning electron microscopy»), чтобы определить влияние типов нагрева на структуру восстановленного КШ. Также для сравнения проводились эксперименты по восстановлению КШ при обычном нагревании.

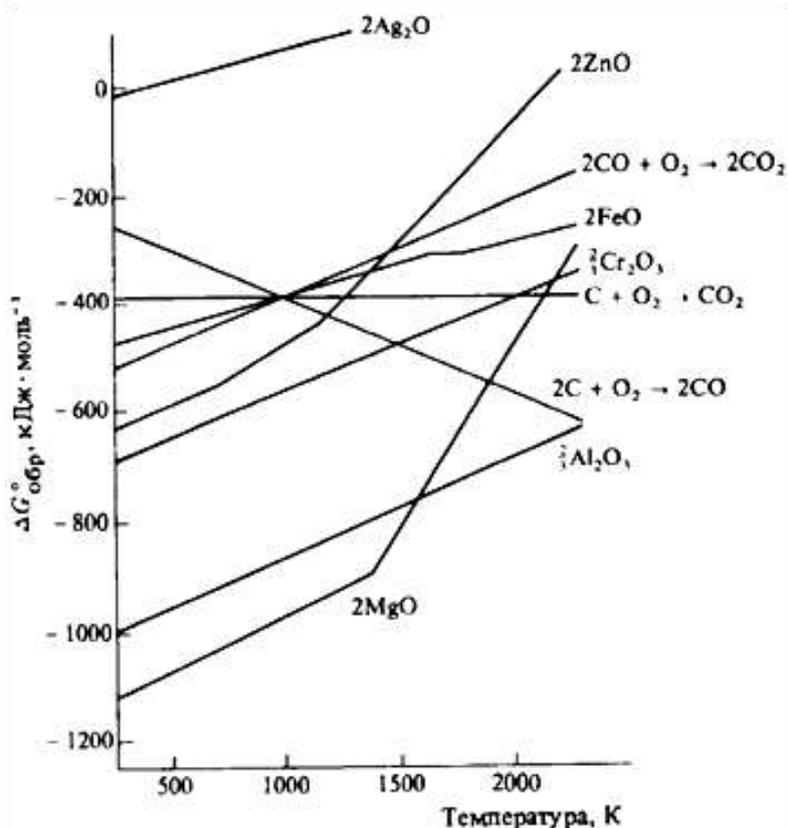


Рис. 1. Диаграмма Эллингема для различных оксидов
 Fig. 1. Ellingham diagram for different oxides

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментов использовали КШ Уральского алюминиевого завода, работающего на привозных бокситах различных потребителей. Но основным сырьем являются бокситы Североуральского бокситового рудника. Твердый остаток бокситов после процесса извлечения из них глинозема имеет крупность частиц преимущественно 0,063–0,072 мм. Из процесса он выводится в виде пульпы с отношением жидкого к твердому от 3 до 5. Для проведения экспериментов отбирали свежий КШ и высушивали его.

Химический состав исходного образца КШ приведен в табл. 1.

Содержание железосодержащих фаз сохраняется на среднестатистическом уровне.

Для исследований в смесителе предварительно подготавливали образцы окатышей в виде смеси КШ с различным соотношением древесного угля, шихту перемешивали в лабораторном смесителе. Далее образцы

«красный шлам – древесный уголь» помещали в тигель и подслоем кварцевого песка нагревали со скоростью 5–6°С/мин, выдерживали в муфельной печи в интервале от 850°С до 1200°С в течение 2 ч, а затем полученный агломерат охлаждали в газовой камере для предотвращения повторного окисления восстановленных образцов КШ.

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа образца красного шлама УАЗа. Видно, что основными соединениями являются гематит (Fe_2O_3), ангидрит (CaSO_4), диопсид ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$), кварц (SiO_2) и кальцит (CaCO_3).

Образцы в виде окатышей нагревали в различных условиях при разном соотношении красного шлама и угля (табл. 2), и по окончании нагрева получали агломерат.

Микроволновая печь состоит из генератора с двумя магнетронами (с рабочей частотой 2,45 ГГц и генерируемой мощностью 900 Вт), направляющих труб, панели управления,

Таблица 1. Химический состав образца красного шлама

Table 1. Chemical composition of the red mud sample

Содержание компонентов, масс. %	Fe_2O_3	Na_2O	SiO_2	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	Sc
Красный шлам	48,26	3,35	8,13	10,98	19,17	1,16	5,51	1,06	0,99	0,11	0,34	0,01

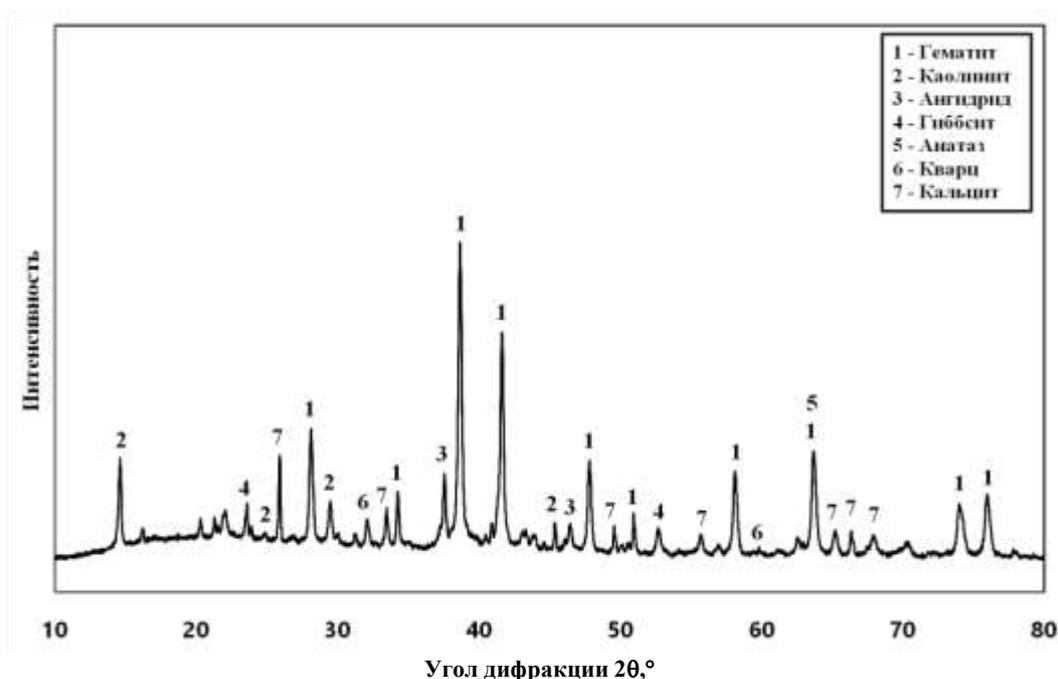


Рис. 2. Фазовый состав образца красного шлама Уральского алюминиевого завода

Fig. 2. Phase composition of a red mud sample from the Ural aluminum smelter

Таблица 2. Характеристики образцов смеси красного шлама и угля
Table 2. Characteristics of red mud and coal mixture samples

Образцы	Содержание в шихте, %		Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин
	красный шлам	древесный уголь		
С1	70	29	850	10
С2	70	29	1000	10

термопары и аппликатора. Через цилиндрическое отверстие на поверхности печи термопара вставляется в центр образца для контроля температуры с помощью цифрового дисплея. В каждом эксперименте образцы окатышей располагались по оси вдоль рабочего контура печи (размер камеры составлял 513 мм × 482 мм × 310 мм), а нагревались по заданному режиму в нормальных атмосферных условиях. Эксперименты проводились при разной температуре в течение 10 мин. Затем образцы охлаждали в рабочей зоне микроволновой печи до комнатной температуры и далее помещали в эксикаторы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроволновая энергия имеет высокий уровень диссипации и быстро рассеивается по всему объему материала, нагревая его (в отличие от прямого нагрева излучением). В результате обработки образцов в микроволновой печи обнаружена неравномерность структуры полученного агломерата, поскольку

ку способность поглощения микроволн различных минеральных фаз в КШ различна, а при микроволновом излучении разница температур при взаимодействии между различными фазами быстро увеличивается. В результате нагрева образец агломерировался, как показано на рис. 3.

Можно предположить, что энергия фазовых переходов оксидов железа КШ действует как тепловой ресурс микроволнового нагрева. Мелкодисперсный образец КШ показал очень хорошую чувствительность к микроволновому нагреву, потому что он содержит основные оксиды минералов, которые подвергаются микроволновому воздействию. Причина может заключаться в том, что режим микроволнового нагрева обеспечивает равномерный нагрев всей массы образца. Это означает, что полярные частицы в образце КШ, подвергаемом микроволновой обработке, нагреваются внутри и снаружи материала одновременно.

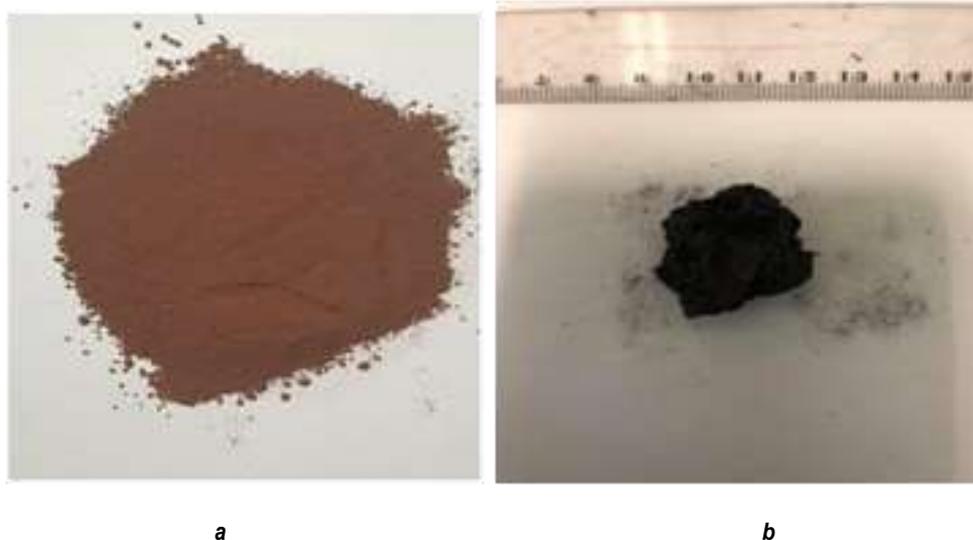


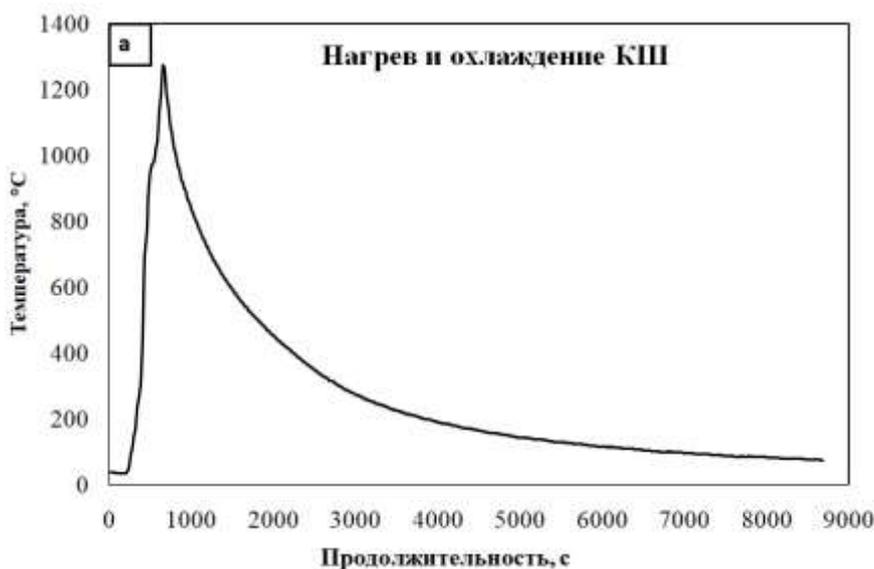
Рис. 3. Агломерация красного шлама при нагреве с древесным углем:
 а – исходный образец красного шлама; б – после 10 мин микроволнового нагрева
Fig. 3. Red mud agglomeration when heated with charcoal:
 а – the initial sample of red mud; б – after 10 min of microwave heating

На рис. 4 показан профиль нагрева образца КШ массой 30, полученного при микроволновой мощности 4 кВт и при продолжительности воздействия 10 мин.

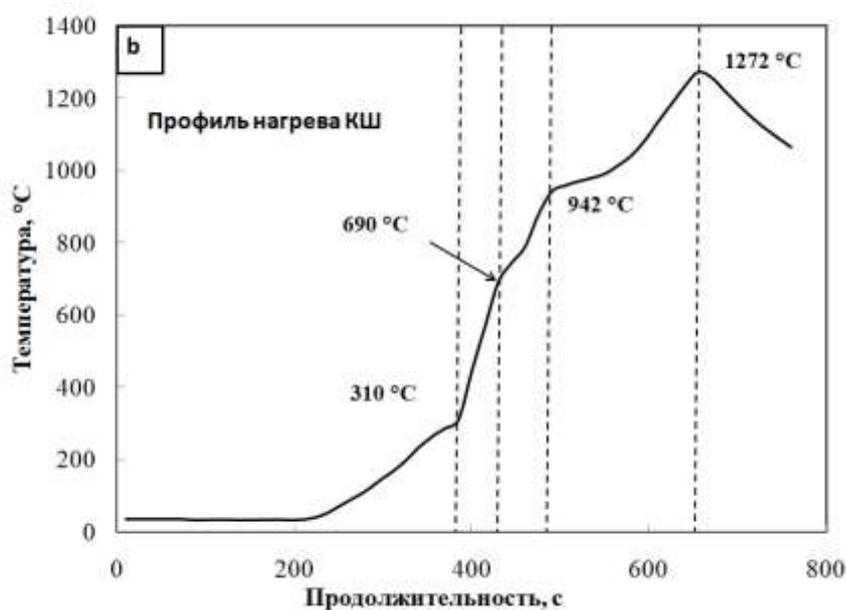
Установлено, что на скорость нагрева образца КШ влияет множество факторов, в том числе и его исходный химический состав, поскольку различные минеральные формы влияют на диэлектрические свойства красного шлама.

Процесс агломерации в объеме образца

проходит неравномерно, поскольку КШ содержит в своем составе активные материалы для микроволнового нагрева – Fe_2O_3 , TiO_2 . Также в КШ имеются и некоторые тугоплавкие оксиды, которые обладают плохой чувствительностью к микроволновому воздействию (Al_2O_3 , MgO , SiO_2 и CaO). На первых этапах нагрева до 1000°C уже через 6 мин частички красного шлама начинают спекаться из-за фазового перехода гематита [39].



a



b

Рис. 4. Профиль микроволнового нагрева образца красного шлама: а – нагрев и охлаждение; б – профиль нагрева
Fig. 4. Microwave heating profile of the red mud sample: a – heating and cooling; b – heating profile

Можно наблюдать несколько этапов изменения профиля кривой микроволнового нагрева образца КШ. Когда температура исследуемого образца достигла 310°C за 310 с, то начинается интенсивное испарение внешней влаги, поскольку даже адсорбированная на поверхности частиц КШ вода в результате разложения гиббсита удаляется при этой же температуре. Далее наблюдается резкий скачок температуры, который возникает под воздействием микроволнового излучения (достижение температуры 690°C за 430 с), что говорит о том, что на этой стадии происходит термическое разложение каолинита. В интервале температур от 690°C до 942°C процессы связаны в основном с разложением карбоната кальция (кальцита). Необходимо отметить важный момент: поскольку CaCO₃ имеет низкую чувствительность к микроволновому излучению, то при дальнейшем повышении температуры в образце он практически не разлагается. Но обнаружено, что когда температура достигла максимального значения 1272°C на 655-й секунде, происходит образование диопсида MgCaSi₂O₆. Таким образом, в результате всех процессов после 10 мин микроволнового нагрева образуется спеченный КШ в виде агломерата. На рис. 5

приведены результаты рентгенофазового анализа исходного образца КШ и после микроволнового нагрева в течение 10 мин. Как видно из рис. 5, некоторые соединения термически разлагаются, например, каолинит, анатаз и гиббсит.

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

Для дальнейшего понимания механизма процессов восстановления во время фазовых переходов от гематита до элементарного железа в образцах КШ был проведен термодинамический анализ. Поскольку основным соединением в КШ является гематит, то реакции с гематитом можно классифицировать как прямое восстановление или переходное состояние. Уравнения прямых фазовых переходов представлены в виде комплекса реакций (где s – твердый, от англ. «solid»; g – газообразный, от англ. «gas»):

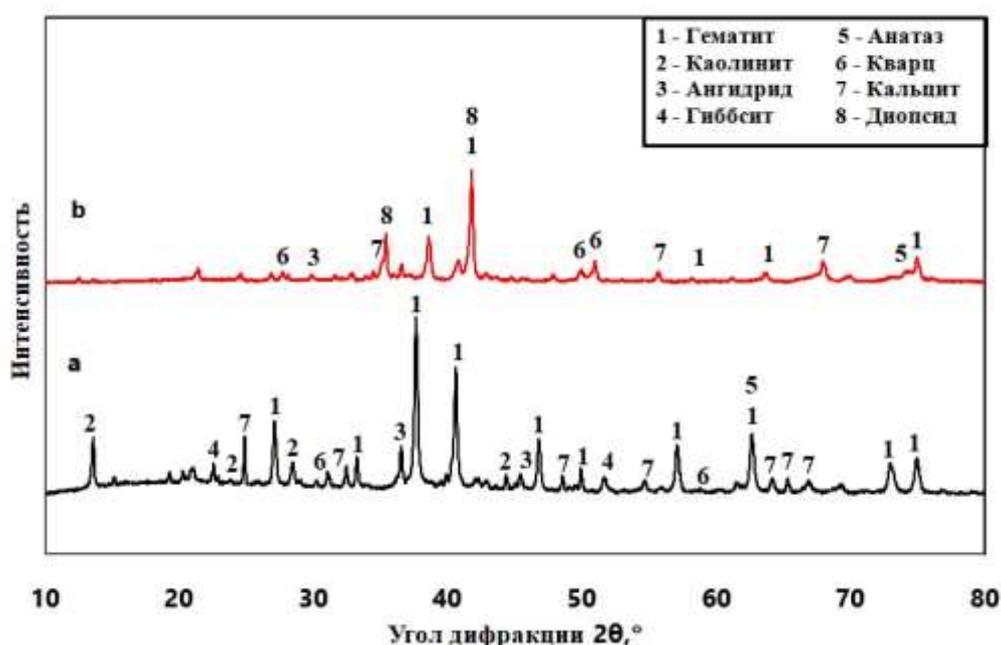
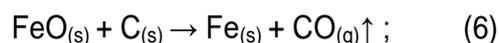
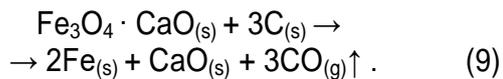
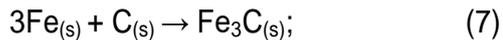
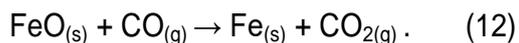


Рис. 5. Рентгенограммы образцов красного шлама: а – исходного; б – после 10 мин микроволнового нагрева
 Fig. 5. X-ray diffraction patterns of the red mud samples: a – initial; b – after 10 min of microwave heating



Побочные этапы восстановления оксидов железа следующие:



Результаты исследования образцов красного шлама в смеси с древесным углем с использованием традиционного прямого нагрева в муфельной печи, полученные при различных температурах, представлены на рентгенограммах. Было установлено, что пики, соответствующие полностью восстановленной фазе железа, усиливались при повышении температуры от 850°C до 1250°C. Между тем переход гематита в другую фазовую форму происходит до 800°C, что свидетельствует о неполном восстановлении гематита до магнетита. С другой стороны, магнетит и вюстит легко образуются при 1250°C.

Результаты исследования образцов красного шлама в смеси с древесным углем с использованием микроволновой печи показали несколько другие результаты фазовых переходов в отличие от традиционного карботермического восстановления. Так, уже при температуре восстановления 850°C гематит сразу превращается в магнетит. Восстановленные фазы исследуемых образцов КШ при температуре 1000°C после 10-минутного воздействия микроволн представлены в основном металлической фазой железа и некоторым количеством вюстита, ангидрита (CaSO_4), каолинита, синего браунмиллерита ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$), кальцита и кварца (рис. 6).

Проведенный рентгеноструктурный анализ образцов после микроволнового нагрева указывает на то, что после 10 мин процесса степень восстановления частиц железа повышается (рис. 7). При этом размер некото-

рых зерен железа в частицах более значителен, что, по всей видимости, связано с процессом полного восстановления железа и срастанием частиц, которые создают устойчивый прочный каркас образца с включениями стекловидных фаз в порах. Морфология пористой структуры указывает на диффузионный массоперенос кислорода за счет взаимодействия с древесным углем с образованием оксида углерода. Разный контраст изображения предполагает наличие дисперсной и взаимосвязанной структуры восстановленных фаз. Элементные Si, Ca, Ti и Al связаны с вновь образованной фазой металлического железа на основе твердофазной реакции при обычных условиях, как показано в спектре А (рис. 7 а).

SEM-EDS (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия от англ. «energy dispersive x-ray spectroscopy») анализ восстановленного образца КШ с использованием микроволнового нагрева показан на рис. 7, где образуется металлическое железо и фиксируется как совокупность частиц неправильной формы, беспорядочно связанных друг с другом в виде небольших агломератов. На рис. 8 представлены микроструктуры некоторых элементов, после восстановления оксидов в условиях микроволнового нагрева, находящихся в красном шламе в смеси с древесным углем.

Анализ карт элементов указывает на то, что силикат натрия, карбонат алюминия и каолиновая фаза содержат множество и других элементов (Na, Ca и Ti, K, Mn и Fe среди других) в виде мелких рассеянных зерен. Именно они и представляют стекловидную фазу в теле агломерата и тем самым повышают его прочность. Анализ микроструктуры образцов при микроволновом излучении показал, что частицы металлического железа имеют больший размер, чем те, которые были получены при прямом нагреве в муфельной печи.

В результате проведенных исследований мы получили железосодержащие продукты, которые могут стать альтернативным сырьем в производстве чугуна и стали, что соответствует концепции развития минерально-сырьевого комплекса России [40, 41].

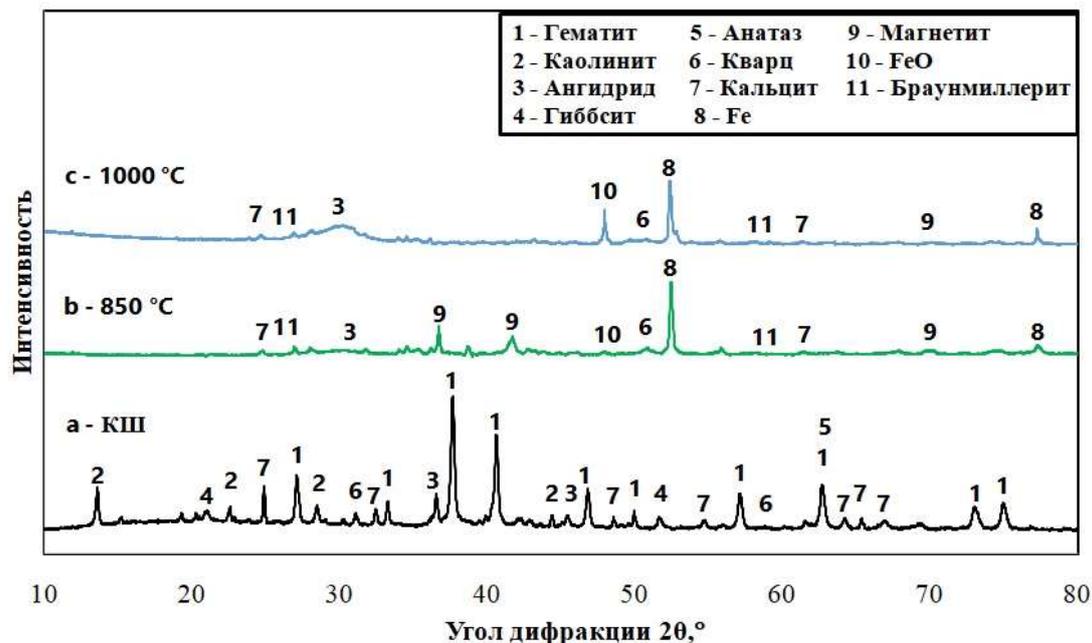


Рис. 6. Рентгенограммы образцов восстановленного древесным углем красного шлама с использованием микроволнового нагрева: а – без обработки; б – при 850°C; с – при 1000°C
 Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the red mud samples reduced by charcoal under microwave heating: a – without treatment; b – at 850°C; c – at 1000°C

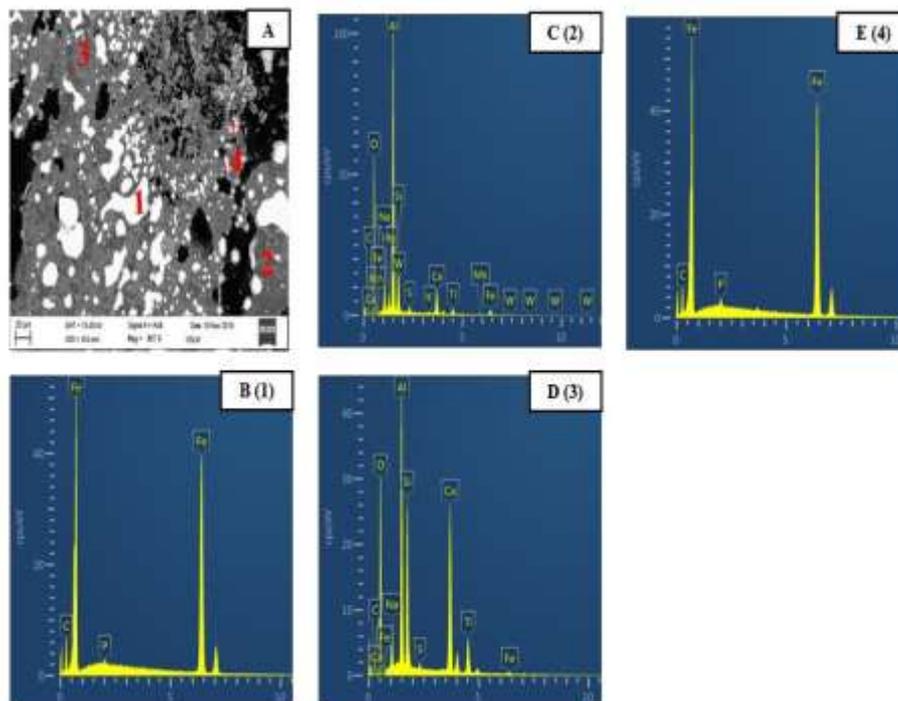


Рис. 7. (А) – Сканирующая электронная микроскопия изображения восстановленных оксидов железа в красном шламе; В (1) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 1 в А; С (2) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 2 в А; D (3) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 3 в А; E (4) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 4 в А
 Fig. 7. (A) – Scanning electron microscopy of the image of reduced iron oxides in red mud; B (1) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 1 in A; C (2) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 2 in A; D (3) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 3 in A; E (4) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 4 in A

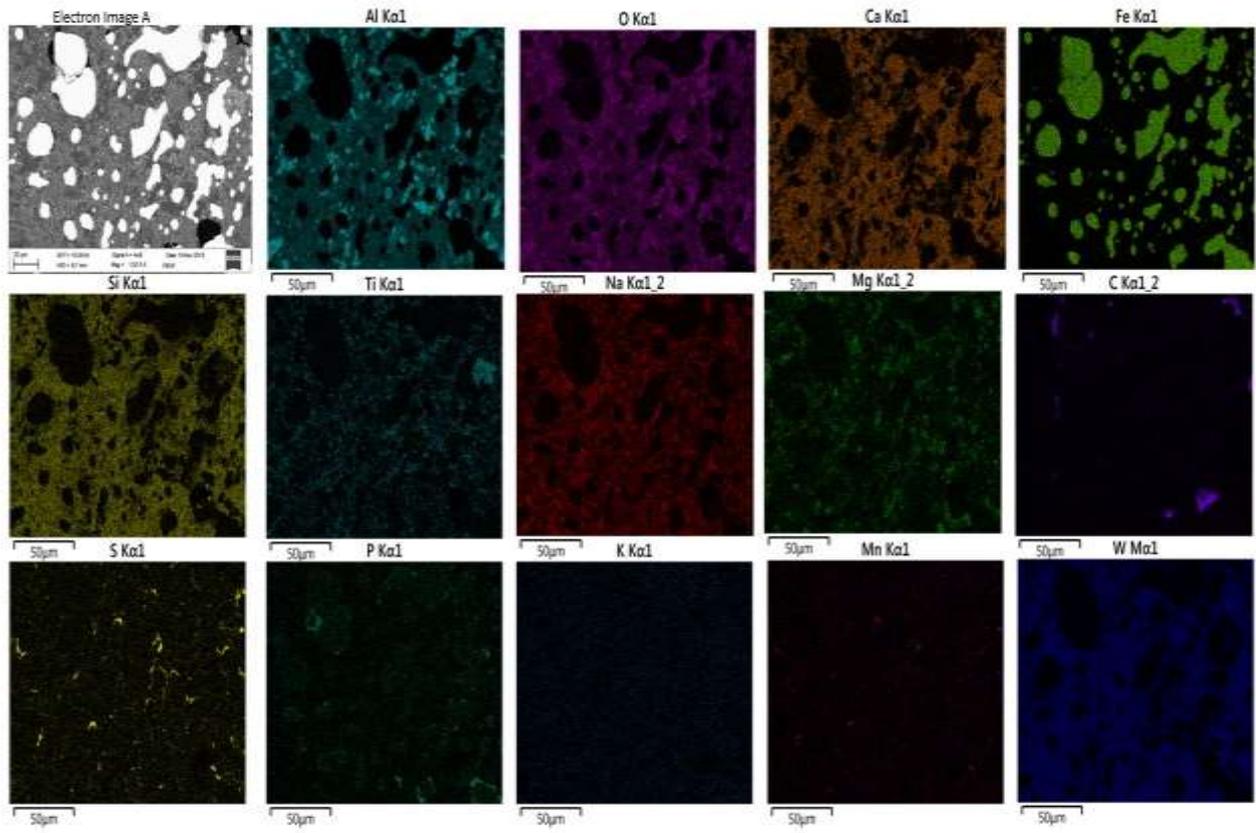


Рис. 8. Карты элементов в образцах красного шлама восстановленного древесным углем с использованием микроволнового нагрева
Fig. 8. Element maps in red mud samples reduced by charcoal under microwave heating

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно обоснован новый подход для переработки красного шлама с получением прочных агломератов под воздействием микроволнового нагрева. Применение микроволн и равномерный прогрев по всему объему образцов указывают на протекание диффузионных процессов, которые интенсифицируют фазовые переходы от гематита до частиц восстановленного железа. Экспериментальные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

– микроволновая обработка шихты из красного шлама с древесным углем повышает эффективность процесса и снижает продолжительность фазовых переходов, что дает преимущество перед обычными восстановительными методами, обеспечивая значительное повышение содержания железа (до 80%) при меньших затратах энергии, сокращении времени выдержки и снижении температуры процесса;

– анализ микроструктуры и морфологии частиц указывает на то, что зерна железа в результате микроволнового нагрева при 1000°C распространяются и располагаются по всему объему образца более равномерно, и их размер значительно больше, чем у агломератов, полученных при традиционной технологии восстановления при той же температуре.

В результате микроволновой обработки получаются более прочные агломераты с частицами восстановленного железа, которые создают каркас с включениями стекловидных фаз.

Новый подход к обработке техногенных продуктов (красного шлама) создает предпосылки для корректировки существующих технологий производства железорудных агломератов и агломератов из красного шлама, которые могут стать составляющими в шихте для проведения доменной плавки.

Список литературы

1. Халифа А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н. Влияние красного шлама на предотвращение полиморфизма двухкальциевого силиката и саморазрушение агломерата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 231–240. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240>
2. Бричкин В.Н., Дубовиков О.А., Николаева Н.В., Беседин А.А. Обезвоживание красного шлама и основные направления его переработки // Обогащение руд. 2014. № 1. С. 44–48.
3. Беседин А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н., Сизяков В.М. Агломерационное спекание красных шламов // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 28–31.
4. Piirainen V.Y., Bueva A.A., Nikitina T.Y. Application of new materials for red mud immobilization // Key Engineering Materials. 2020. № 854. P. 182–188.
5. Трушко В.Л., Дашко Р.Э., Кусков В.Б., Клячко А.С. Технология «холодного» брикетирования богатых руд Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 133–137.
6. Akcil A., Akhmediyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: focus on Scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Vol. 39. Iss. 3. P. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
7. Dmitriev A. The comprehensive utilisation of red mud utilisation in blast furnace // Metallurgical Solid Waste / ed. Yingyi Zhang. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80087>
8. Zhou Xianlin, Luo Yanhong, Chen Tiejun, Zhu Deqing. Enhancing the reduction of high-aluminum iron ore by synergistic reducing with high-manganese iron ore // Metals. 2019. Vol. 9. Iss. 15. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/met9010015>
9. Пягай И.Н., Кожевников В.Л., Пасечник Л.А., Скачков В.М. Переработка отвального шлама глиноземного производства с извлечением скандиевого концентрата // Записки Горного Института. 2016. Т. 218. С. 225–232.
10. Pontikes Y., Angelopoulos G.N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: current status and a possible way forward // Resources, Conservation and Recycling. 2013. Vol. 73. P. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005>
11. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2005. Vol. 26. Iss. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>
12. Rai S., Wasewar K.L., Mukhopadhyay J., Yoo C., Uslu H. Neutralization and utilization of red mud for its better waste management // Archives of Environmental Science. 2012. Vol. 6. P. 13–33.
13. Garg A, Yadav H. Study of red mud as an alternative building material for interlocking block manufacturing in construction industry // International Journal of Materials Science and Engineering Study. 2015. Vol. 3. Iss. 4. P. 295–300. <https://doi.org/10.17706/ijmse.2015.3.4.295-300>
14. Трушко В.Л., Кусков В.Б., Кускова Я.В. Комплексная переработка богатых железных руд // Обогащение руд. 2014. № 1. P. 39–43.
15. Kuskova Y.V., Kuskov V.B. Development of technology for the production of natural red iron oxide pigments // Inżynieria Mineralna. 2017. № 1. P. 217–220.
16. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Iss. 9. Part 1. P. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
17. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values // Journal of Sustainable Metallurgy. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 427–43. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0183-3>
18. Trushko V.L., Utkov V.A., Sivushov A.A. Reducing the environmental impact of blast furnaces by means of red mud from alumina production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 8. P. 576–578. <https://doi.org/10.3103/S0967091217080149>
19. Shiryaeva E.V., Podgorodetskiy G.S., Malysheva T.Ya., Detkova T.V., Gorbunov V.B. Influence of lowalkali red mud on the composition and structure of sintering batch consisting of heterogeneous iron ore concentrates // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 9. P. 625–628. <https://doi.org/10.3103/S0967091214090150>
20. Трушко В.Л., Утков В.А. Разработка импортозамещающих технологий повышения производительности агломерационных машин и прочности агломератов // Записки Горного Института. 2016. Т. 221. С. 675–680. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.5.675>
21. Podgorodetskiy G., Gorbunov V., Panov A., Petrov S., Gorbachev S. Complex additives on the basis of red mud for intensification of iron-ore sintering and pelletizing // Light Metals / ed. M. Hyland. 2015. P. 107–111. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch20>
22. Kumar R., Srivastava J.P., Premchand. Utilization of iron values of red mud for metallurgical applications // Environmental and Waste Management / eds. A. Bandyopadhyay, N.G. Goswami, P.R. Rao. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory, 1998. P. 108–119. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2077.7446>
23. Balomenos E., Panias D. Iron recovery and production of high added value products from the metallurgical by-products of primary aluminium and ferronickel industries // 3rd International Slag Valorisation Symposium (Leuven, 19–20 March 2013). Leuven, 2013. P. 161–172.
24. Branca T.A., Colla V., Algermissen D., Granbom H., Martini U., Morillon A., Pietruck R., Rosendahl S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe // Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 345. <https://doi.org/10.3390/met10030345>
25. Sadangi J.K., Das S.P., Tripathy A., Biswal S. K. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps // Separation Science and Technology. 2018. Vol. 53. Iss. 14. P. 2186–2191. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1446984>
26. Утков В.А., Леонтьев Л.И. Повышение прочности агломератов и окатышей при помощи бокситового

красного шлама // Сталь. 2005. Т. 9. С. 2–4.

27. Singh S., Gupta D., Jain V., Sharma A.K. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 30. Iss. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952028>

28. Jones D.A., Lelyveld T.P., Mavrofidis S.D., Kingman S.W., Miles, N.J. Microwave heating applications in environmental engineering - A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2002. Vol. 34. Iss. 2. P. 75–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00088-X)

29. Nishioka K., Taniguchi T., Ueki Y., Ohno K-I., Maeda T., Shimizu M. Gasification and reduction behavior of plastics and iron ore mixtures by microwave heating // *ISIJ International*. 2007. Vol. 47. Iss. 4. P. 602–607. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.602>

30. Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Prospects of microwave processing: An overview // *Bulletin of Materials Science*. 2009. Vol. 32. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>

31. Guo Sheng-hui, Chen Guo, Peng Jin-hui, Chen Jin, Li Dong-bo, Liu Li-jun. Non-isothermal microwave leaching kinetics and absorption characteristics of primary titanium-rich materials // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. Vol. 20. Iss. 4. P. 721–726. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60204-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60204-1)

32. Omran M., Fabritius T. Improved removal of zinc from blast furnace sludge by particle size separation and microwave heating // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127. P. 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.002>

33. Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-temperature microwave processing of materials // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. Vol. 34. P. R55–

R75. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201>

34. Clark D.E., Folz D.C., West J.K. Processing materials with microwave energy // *Materials Science and Engineering A*. 2000. Vol. 287. No. 2. P. 153–158.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00768-1)

35. Vereš J., Lovás M., Hredzák S., Zubrik A., Dolinská S., Skřínský J. Application of microwave energy in waste treatment // *Inzynieria Mineralna*. 2017. Vol. 2017. Iss. 1. P. 39–44.

36. Agrawal D. Latest global developments in microwave materials processing // *Materials Research Innovations*. 2010. Vol. 14. Iss. 1. P. 3–8. <https://doi.org/10.1179/143307510X12599329342926>

37. El-Geassy A.A., Halim K.S.A., Bahgat M., Mousa E.A., El-Shereafy E.E., El-Tawil A.A. Carbothermic reduction of Fe₂O₃/C compacts: Comparative approach to kinetics and mechanism // *Ironmaking and Steelmaking*. 2013. Vol. 40. Iss. 7. P. 534–544. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000076>

38. Aune R.E., Seetharaman S. Thermodynamic aspects of metals processing // *Fundamentals of metallurgy* // ed. S. Seetharaman. England: ED, 2005. P. 38–81.

39. Haque K.E. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review // *International Journal of Mineral Processing*. 1999. Vol. 57. P. 1–24.

40. Litvinenko V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied natural gas // *Resources*. 2020. Vol. 9. Iss. 59. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/resources9050059>

41. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. No. 3. P. 1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>

References

1. Khalifa AA, Utkov VA, Brichkin VN. Red mud effect on dicalcium silicate polymorphism and sinter self-destruction prevention. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(1):231–240. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240>

2. Brichkin VN, Dubovikov OA, Nikolaeva NV, Besedin AA. Red mud dewatering and basic trends in its recycling. *Obogashcheniye rud*. 2014;1:44–48. (In Russ.)

3. Besedin AA, Utkov VA, Brichkin VN, Sizyakov VM. Red mud sintering. *Obogashcheniye rud*. 2014;2:28–31. (In Russ.)

4. Piirainen VY, Boeva AA, Nikitina TY. Application of new materials for red mud immobilization. *Key Engineering Materials*. 2020;854:182–188.

5. Trushko VL, Dashko RE, Kuskov VB, Klyamko AS. Technology of “cold” briquetting of rich ores of the Jakovlevsky deposit. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2011;190:133–137. (In Russ.)

6. Akcil A, Akhmediyeva N, Abdulvaliyev R, Abhilash, 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):145–151.

<https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>

7. Dmitriev A. The comprehensive utilisation of red mud utilisation in blast furnace. In: Zhang Yingyi (ed.). *Metallurgical Solid Waste*. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80087>

8. Zhou Xianlin, Luo Yanhong, Chen Tiejun, Zhu Deqing. Enhancing the reduction of high-aluminum iron ore by synergistic reducing with high-manganese iron ore. *Metals*. 2019;9(15):1–12. <https://doi.org/10.3390/met9010015>

9. Pyagay IN, Kozhevnikov VL, Pasechnik LA, Skachkov VM. Processing of alumina production red mud with recovery of scandium concentrate. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;218:225–232. (In Russ.)

10. Pontikes Y, Angelopoulos GN. Bauxite residue in cement and cementitious applications: current status and a possible way forward. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:53–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005>

11. Paramguru RK, Rath PC, Misra VN. Trends in red mud utilization – a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005;26(1):1–29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>

12. Rai S, Wasewar KL, Mukhopadhyay J, Yoo C, Uslu H.

Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. *Archives of Environmental Science*. 2012;6:13–33.

13. Garg A, Yadav H. Study of red mud as an alternative building material for interlocking block manufacturing in construction industry. *International Journal of Materials Science and Engineering Study*. 2015;3(4):295–300. <https://doi.org/10.17706/ijmse.2015.3.4.295-300>

14. Trushko VL, Kuskov VB, Kuskova YV. Integrated processing of highgrade iron ores. *Obogashcheniye rud*. 2014;1:39–43. (In Russ.)

15. Kuskova YV, Kuskov VB. Development of technology for the production of natural red iron oxide pigments. *Inżynieria Mineralna = Journal of the Polish Mineral Engineering*. 2017;1:217–220.

16. Agrawal S, Rayapudi V, Dhawan N. Extraction of iron values from red mud. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9-1):17064–17072.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>

17. Agrawal S, Rayapudi V, Dhawan N. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2018;4(3):427–43. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0183-3>

18. Trushko VL, Utkov VA, Sivushov AA. Reducing the environmental impact of blast furnaces by means of red mud from alumina production. *Steel in Translation*. 2017;47(8):576–578.

<https://doi.org/10.3103/S0967091217080149>

19. Shiryayeva EV, Podgorodetskiy GS, Malysheva TYa, Detkova TV, Gorbunov VB. Influence of lowalkali red mud on the composition and structure of sintering batch consisting of heterogeneous iron ore concentrates. *Steel in Translation*. 2014;44(9):625–628. <https://doi.org/10.3103/S0967091214090150>

20. Trushko VL, Utkov VA. Development of import substituting technologies for increasing productivity of sintering machines and strength of agglomerates. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;221:675–680. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.5.675>

21. Podgorodetskiy G, Gorbunov V, Panov A, Petrov S, Gorbachev S. Complex additives on the basis of red mud for intensification of iron-ore sintering and pelletizing. In: Hyland M (ed.). *Light Metals*; 2015, p. 107–111. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch20>

22. Kumar R, Srivastava JP, Premchand. Utilization of iron values of red mud for metallurgical applications. In: Bandopadhyay A, Goswami NG, Rao PR (eds.). *Environmental and Waste Management*. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory; 1998, p. 108–119. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2077.7446>

23. Balomenos E, Pnias D. Iron recovery and production of high added value products from the metallurgical by-products of primary aluminium and ferronickel industries. In: *3rd International Slag Valorisation Symposium*. 19–20 March 2013, Leuven. Leuven; 2013, p. 161–172.

24. Branca TA, Colla V, Algermissen D, Granbom H, Martini U, Morillon A, Pietruck R, Rosendahl S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*. 2020;10(3):345.

<https://doi.org/10.3390/met10030345>

25. Sadangi JK, Das SP, Tripathy A, Biswal S. K. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps. *Separation Science and Technology*. 2018;53(14):2186–2191. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1446984>

26. Utkov VA, Leontiev LI. Increasing the strength of agglomerates and pellets with bauxite red mud. *Stal'*. 2005;9:2–4. (In Russ.)

27. Singh S, Gupta D, Jain V, Sharma AK. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(1):1–29. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952028>

28. Jones DA, Lelyveld TP, Mavrofidis SD, Kingman SW, Miles, NJ. Microwave heating applications in environmental engineering – a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002;34(2):75–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00088-X)

29. Nishioka K, Taniguchi T, Ueki Y, Ohno K-I, Maeda T, Shimizu M. Gasification and reduction behavior of plastics and iron ore mixtures by microwave heating. *ISIJ International*. 2007;47(4):602–607.

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.602>

30. Das S, Mukhopadhyay AK, Datta S, Basu D. Prospects of microwave processing: An overview. *Bulletin of Materials Science*. 2009;32(1):1–13. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>

31. Guo Sheng-hui, Chen Guo, Peng Jin-hui, Chen Jin, Li Dong-bo, Liu Li-jun. Non-isothermal microwave leaching kinetics and absorption characteristics of primary titanium-rich materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010;20(4):721–726. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60204-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60204-1)

32. Omran M, Fabritius T. Improved removal of zinc from blast furnace sludge by particle size separation and microwave heating. *Minerals Engineering*. 2018;127:265–276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.002>

33. Bykov YuV, Rybakov KI, Semenov VE. High-temperature microwave processing of materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001;34:R55–R75. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201>

34. Clark DE, Folz DC, West JK. Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering A*. 2000;287(2):153–158. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00768-1)

35. Vereš J, Lovás M, Hredzák S, Zubrik A, Dolinská S, Skřinský J. Application of microwave energy in waste treatment. *Inżynieria Mineralna = Journal of the Polish Mineral Engineering*. 2017;2017(1):39–44.

36. Agrawal D. Latest global developments in microwave materials processing. *Materials Research Innovations*. 2010;14(1):3–8. <https://doi.org/10.1179/143307510X12599329342926>

37. El-Geassy AA, Halim KSA, Bahgat M, Mousa EA, El-Shereafy EE, El-Tawil AA. Carbothermic reduction of Fe₂O₃/C compacts: Comparative approach to kinetics and mechanism. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):534–544.

<https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000076>

38. Aune RE, Seetharaman S. Thermodynamic aspects of



metals processing. In: Seetharaman S. (ed.). *Fundamentals of metallurgy*. England: ED; 2005, p. 38–81.
39. Haque KE. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;57:1–24.
40. Litvinenko V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied

natural gas. *Resources*. 2020;9(59):1–22. <https://doi.org/10.3390/resources9050059>
41. Litvinenko VS. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29(3):1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Халифа Ахмед Абделазим Элсайед Ибрагим Абду, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Бажин Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Шалаби Мохамед Эль Меншауй Хуссейн, профессор, доктор технических наук, Центральный научно-исследовательский металлургический институт, 11421, г. Каир, г. Хелуан, пос. Эль-Таббин, ул. Эльфелезат, 1, Египет;
e-mail: mehshalabi@hotmail.com

Абдельмонеим Ахмед, аспирант, Университет Оулу, FI-90014, г. Оулу, р-н Линнанмаа, ул. Пентти Кайтеран кату, 1, Финляндия;
e-mail: ahmed.abdelmonem@oulu.fi

Омран Мамдух, доцент исследовательская группа технологической металлургии, Университет Оулу, FI-90014, г. Оулу, р-н Линнанмаа, ул. Пентти Кайтеран кату, 1, Финляндия;
e-mail: mamdouh.omran@oulu.fi

Заявленный вклад авторов

Халифа Ахмед Абделазим Элсайед Ибрагим Абду – изучение особенностей технологии утилизации красного шлама путем карботермического восстановления при обработке микроволнами, методология и процесс исследования. Бажин Владимир Юрьевич – планирование эксперимента для изучения технологии утилизации красного шлама путем карботермического восстановления при микроволновой обработке и обсуждение результатов. Шалаби Мохамед Эль Меншауй

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ahmed A. Khalifa, Ph.D. student, St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Vladimir Yu. Bazhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Mohammed E.-M.H. Shalabi, Professor, Dr. Sci. (Eng.), Central Metallurgical Research Institute, 1, Elfelezat St., El-Tebbin, Helwan, Cairo 11421, Egypt;
e-mail: mehshalabi@hotmail.com

Ahmed Abdelmoneim, Ph.D. student, University of Oulu, Pentti Kaiteran katu 1, Linnanmaa, FI-90014, Oulu, Finland;
e-mail: ahmed.abdelmonem@oulu.fi

Mamdouh Omran, Associate Professor of the Process Metallurgy Research Group, University of Oulu, Pentti Kaiteran katu 1, Linnanmaa, FI-90014, Oulu, Finland;
e-mail: mamdouh.omran@oulu.fi

Contribution of the authors

Khalifa Ahmed Abdelazim Elsayed Ibraheem Abdou studied the features of the recycling technology of red mud by carbothermal reduction under microwave treatment, methodology and research. Bazhin Vladimir was responsible for planning the experiment for studying the recycling technology of red mud by carbothermal reduction under microwave treatment and result discussion. Mohamed El-Menshawi Hussein Shalabi gave the rationale for the study and made the conclusions of the scientific results.

Хуссейн – обоснование исследования и выводы научных результатов. Абдельмонеим Ахмед– обработка результатов эксперимента. Омран Мамдух– интерпретация научных результатов и проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.01.2021; одобрена после рецензирования 01.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Ahmed Abdelmoneim processed the results of the experiment. Mamdouh Omran performed the interpretation of the scientific results and conducted experiments.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 11.01.2021; approved after reviewing 01.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.