Исследование процессов комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья

Смирнов А. Н.^{1*}, Ключковский С. П.¹, Крылова С. А.¹, Сысоев В. И.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

*e-mail: sman@magtu.ru

Реферат

Введение. В исходной руде и продукте ее обжига железо и магний входят в общую кристаллическую решетку, что является основным препятствием, ограничивающим широкое использование руд Бакальской группы месторождений.

Цель работы – разработка физико-химических основ комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритовых руд методами пиро- и гидрометаллургии.

Методология исследования основана на анализе результатов, полученных методами термогравиметрии, рентгеновской и мессбауэровской спектроскопии, хроматографии. Анализ позволил определить необходимые условия термообработки, выщелачивания, химический, фазовый состав, структуру и свойства продуктов комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья.

Результаты. Предложена схема комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья, апробация которой в лабораторных условиях показала возможность повышения содержания железа в концентрате на 7 % и получения до 100–120 кг/т концентрата высокоактивной магнезии с содержанием не менее 98 % оксида магния. Установлено, что продукты комплексной переработки каталитически активны в отношении конверсии этанола водяным паром, реакции водяного газа, конверсии каменного угля Кузнецкого бассейна.

Выводы. Предлагаемая технология, не изменяя экологических условий существующих способов переработки высокомагнезиальных сидеритовых руд, позволяет повысить степень извлечения железа и сопутствующих элементов.

Ключевые слова: комплексная переработка природных высокомагнезиальных сидеритов; железорудный концентрат; магнезия; термомеханическое обогащение; диоксид углерода; выщелачивание; катализ.

Введение. В настоящее время металлургические комбинаты Уральского региона обеспечены местным сырьем только на 50–60 %, при этом запасы качественного железорудного сырья неуклонно сокращаются. В связи с этим возникает необходимость расширить местную сырьевую базу и задействовать труднообогатимые руды, которые до настоящего времени либо вообще не использовались, либо использовались в ограниченных масштабах. В недрах Уральского региона залегают крупные месторождения титаномагнетитовых, сидеритовых, железохромоникелевых и других би- и поликомпонентных руд, которые помимо железа содержат титан, хром, никель, магний и другие необходимые для промышленности элементы. Дальнейшее стабильное развитие черной металлургии Урала подразумевает решение задачи эффективной переработки данных руд, что предполагает как увеличение глубины извлечения железа, так и расширение спектра извлекаемых компонентов. При этом технологические схемы подготовки уральских руд к металлургическому производству должны сводить к минимуму экологическую нагрузку на окружающую среду [1, 2].

В общей доле разведанных запасов железных руд Уральского региона около 10 % (свыше 1 млрд т) приходится на сидеритовые, представленные Бакальской

группой месторождений. Руды Бакала характеризуются относительно низким содержанием железа (27–30 %) и высоким – оксида магния (10–13 %), избыток которого во время плавки приводит к образованию высоковязких и тугоплавких шлаков. В настоящее время сидеритовые руды крайне ограниченно используются в доменном процессе, так как разделение их компонентов на базе технологической схемы подготовки, применяемой в настоящее время Бакальским рудоуправлением, принципиально невозможно.

Среди исследований в области улучшения современной технологии переработки магнезиальных сидеритов можно выделить два направления [3–8].

Первое – это совершенствование так называемых традиционных методов обогащения, применение которых направлено на удаление вмещающих пород и связанного с ними магния. Для предварительного обогащения данных руд применяют промывку (США, Польша), отсадку (Германия, Австрия), обогащение в тяжелых суспензиях (Австрия, Германия, Канада). Применение к продуктам предварительного обогащения магнетизирующего обжига с последующей магнитной сепарацией также повышает массовую долю железа в концентрате. Традиционные методы обогащения эффективны при переработке магнезиальных сидеритов с небольшим содержанием магния в руде.

В рамках второго направления исследований основной упор делается именно на способы разделения магния и железа методами химического обогащения руды или продукта ее термического разложения с последующим выделением магния. Это, например, высокотемпературный восстановительный обжиг, приводящий к выделению железа в самостоятельную фазу, при этом оксид магния переходит в шлак, т. е. оксид магния, содержащийся в сидеритах, идет практически в отходы [9, 10]. Выделение оксида магния из продуктов обжига высокомагнезиальных сидеритов возможно с использованием сильных минеральных кислот, например серной, соляной, азотной. В этом случае кроме железосодержащего концентрата возможно получение солей магния или его оксида, но реализация этих и подобных способов сопряжена с рядом экономических и экологических проблем.

Выполненные исследования позволили авторам сформулировать физико-химические основы технологии комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья, например бакальских сидеритов, которые дают возможность получения ряда продуктов без привлечения посторонних химических реагентов и ухудшения экологических условий существующего способа производства концентрата.

Методология исследования. Основу сидеритовых руд составляет карбонат железа FeCO_3 , который в природных условиях в чистом виде практически не встречается и зачастую имеет изоморфную примесь магния, а также марганца, кальция и других элементов. Карбонат железа образует непрерывный ряд изоморфного замещения с карбонатом магния – от чистого FeCO_3 (сидерит) до чистого MgCO_3 (магнезит). В ряду изоморфного замещения в зависимости от содержания MgCO_3 выделяют устойчивые члены ряда: сидероплезит – до 30 %; пистомезит – от 30 до 50 %; мезитит – от 50 до 70 % и брейнерит – от 70 %.

Объектом исследования выбраны руды Бакальской группы месторождений, в которых основной железосодержащий минерал сидероплезит (≈ 80 %) содержит до 25 % оксида магния. Железо в бакальской руде в незначительных количествах присутствует также в виде гидроксидов, оксидов и пирита. Содержание вмещающих пород (доломит, кальцит, алюмосиликаты, сланцы и другие) колеблется в пределах 20–25 %. Бакальские руды довольно чистые по фосфору, цинку, меди (менее 0,05 %), в них мало серы (в среднем 0,1 %) и, кроме того, они содержат примерно 1–2 % карбоната марганца. Средний химический состав сидероплезита

сидеритовых руд Бакальского месторождения соответствует химической формуле: $(\text{Fe}_{0,72}\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,03})\text{CO}_3$. Железо, магний и марганец в руде распределены достаточно равномерно, что подтверждает существование общей кристаллической решетки карбонатов перечисленных элементов, тогда как примесные породы присутствуют в виде локальных включений. Равномерность распределения основных компонентов сохраняется и в продуктах обжига руды. В зависимости от условий проведения обжига, продолжительности, температуры, состава газовой фазы железо и магний образуют совокупность твердых растворов в интервале от устойчивой шпинели магнезиоферрита до магнезиовюстита. Поэтому без структурного разрушения общей кристаллической решетки нельзя значительно снизить содержание оксида магния в концентрате [11].

Таблица 1. Усредненный химический состав основных компонентов бакальских сидеритов и продуктов обогащения
Table 1. Average chemical composition of the main components of the Bakal sideritic ore and the products of its beneficiation

Массовая доля, %	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	П.п.п
Исходная руда	27,4	34,0	1,4	3,2	7,3	1,12	12,9	2,5	35,9
Магнитная часть КОС	51,6	21,9	49,4	2,5	1,7	1,72	17,8	0,7	3,5
Немагнитная часть (хвосты)	13,5	11,3	87,3	5,9	19,0	0,75	13,0	10,3	38,1
Железорудный концентрат магнезиальный (ЖКМ)	61,2	0,2	82,6	2,7	2,0	1,93	5,7	0,9	3,1
Магнезия	0,09	—	—	0,13	0,83	0,05	98,5	—	0,2

П.п.п – Потери при прокаливании.

Применяемая технология обогащения Бакальских сидеритов сводится к обжигу сырой руды в шахтных печах при 1000–1100 °С в окислительной атмосфере с последующей сухой магнитной сепарацией (СМС) [12]. Железосодержащая часть образующегося при этом концентрата обожженного сидерита (КОС) состоит в основном из химически устойчивой шпинели – магнезиоферрита MgFe_2O_4 :

После обогащения КОС содержит до 52 % общего железа и большое количество (свыше 16–18 %) оксида магния (табл. 1).

Даже в случае полного отделения вмещающей породы, когда КОС представлял бы собой чистый магнезиоферрит, высокое содержание в нем оксида магния (до 20 %) ограничивает его широкое применение в металлургии, поэтому он используется только в качестве подшихтовки в смеси с другими рудами. Установлено, что из магнезиоферрита MgFe_2O_4 , образующегося в условиях высокотемпературного окислительного обжига, селективное выщелачивание оксида магния без применения сильных кислот (соляной, азотной, серной) невозможно. Если же проводить так называемый «мягкий» обжиг, т. е. обжиг при температуре 550–650 °С без доступа кислорода воздуха, когда обжигу подвергается кусковая руда при толщине слоя 40–60 мм, то такой способ существенно меняет как состав продукта обжига, так и его свойства. При обжиге в интервале 550–650 °С диссо-

цирует только основной минерал – сидероплезит, а вмещающие породы – доломит, кальцит – практически не разлагаются, сохраняя свои физико-химические свойства. Кроме того, основным продуктом «мягкого» обжига является твердый раствор – магнезиевюстит (FeO-MgO), так как образование магнезиальной шпинели – магнезиоферрита (MgFe_2O_4) затруднено как по кинетическим причинам – снижение температуры обжига, так и по термодинамическим – снижение окислительного потенциала газовой фазы. В результате из продукта «мягкого» обжига становится возможным селективное выщелачивание оксида магния слабой угольной кислотой (раствор диоксида углерода в воде) [12–14].

Таким образом, принципиальные отличия технологии комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья сводятся к необходимости проведения обжига сырой руды при температуре 600–650 °С без доступа кислорода воздуха с дальнейшей активацией продукта обжига и выщелачиванием оксида магния раствором диоксида углерода в воде (основные блоки существующей и предлагаемой технологии приведены на рис. 1).

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для определения химического состава руды, концентратов и хвостов магнитного обогащения, а также получаемой магнезии (табл. 1) использовали рентгеновский энергодисперсионный спектрометр ARL QUANT'X (Thermo Scientific, анод трубки – стандартно Rh, дополнительно Ag). Качественный и количественный фазовый состав образцов определяли на дифрактометрах SHIMADZU XRD-7000 и D8 ADVANCE (Bruker AXS, программный пакет DIFFRAC.TOPAS (версия 4.2)). В условиях «мягкого» обжига кроме основных фаз – магнезиевюстита, магнетита, магнезиоферрита – образуется и твердый раствор, где в качестве компонентов выступают магнетит $[\text{FeO}]\text{Fe}_2\text{O}_3$ и магнезиоферрит $[(\text{MgO})_x \cdot (\text{FeO})_{(1-x)}]\text{Fe}_2\text{O}_3$ – нестехиометрический магнезиоферрит. Необходимо отметить, что магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{Fe}^{2+}2\text{Fe}^{3+}\text{O}_4)$ и магнезиоферрит $\text{MgFe}_2\text{O}_4(\text{Mg}^{2+}2\text{Fe}^{3+}\text{O}_4)$ имеют идентичную кристаллическую структуру. Разница между этими двумя минералами в том, что одна и та же кристаллографическая позиция в структуре занята либо Fe^{2+} , либо Mg^{2+} , а количество того или иного компонента может меняться от 0 до 1. Нестехиометрический магнезиоферрит был идентифицирован методом мессбауэровской спектроскопии (спектрометр CM2201, источник излучения ^{57}Co в матрице Rh). Продукт термического разложения сидероплезита обладает магнитными свойствами, что позволяет отделять его от основной части нерудных материалов (немагнитная часть, см. табл. 1) доля которых в продукте обжига не более 20 %.

Образование основных фаз в процессе «мягкого» обжига происходит в результате протекания следующих реакций:

Из магнитной части продукта «мягкого» обжига в течение пяти часов при комнатной температуре и давлении диоксида углерода в одну атмосферу удается извлекать до 50 % оксида магния. Оксид магния переходит в раствор в виде растворимого бикарбоната магния:

a

б

Рис. 1. Принципиальные схемы применяемой – а и предлагаемой – б технологии переработки высокомагнезиальных сидеритов

Fig. 1. Schematic diagram of the applied – a and proposed – б technology of high-magnesia siderites processing

Для увеличения полноты и скорости извлечения оксида магния из продуктов «мягкого» обжига были разработаны способы их активации, в частности активация водяным паром при температуре 400–450 °С. После активации из продуктов «мягкого» обжига стало возможным извлекать за один час не менее 60 % оксида магния. Анализ экспериментальных данных показал, что в процессе активации водяным паром происходит либо дезинтеграция основной фазы FeO–MgO с выделением оксида магния:

либо воздействие водяного пара приводит к существенному увеличению содержания оксида магния в твердом растворе переменного состава FeO · MgO, что значительно облегчает извлечение из него оксида магния раствором диоксида углерода в воде. Например, если до активации среднее соотношение между компонентами твердого раствора $\text{FeO}_x \cdot \text{MgO}_{1-x}$ соответствовало составу $\text{FeO}_{0,47} \cdot \text{MgO}_{0,53}$, то после активации состав твердого раствора изменился до $\text{FeO}_{0,09} \cdot \text{MgO}_{0,91}$.

Хроматографический анализ (хроматографический комплекс «Хроматэк Кристалл 5000») газовой фазы, образующейся при «мягком» обжиге высокомагнезиальной сидеритовой руды, показал, что основными газообразными продуктами обжига являются CO_2 и CO в соотношении примерно 4 : 1. Газовая фаза такого состава может быть использована для получения угольной кислоты (раствор диоксида углерода в воде), идущей на выщелачивание оксида магния. При этом в газовой фазе, прошедшей через раствор, существенно возрастает доля CO, что повышает ее восстановительный потенциал, удельную теплотворную способность и перспективность ее использования в реакциях синтеза.

Наличие углерода в продуктах «мягкого» обжига (анализатор CW MULTISHASE, ELTRA) указывает на каталитический характер реакции (1), которая в данных условиях без катализатора практически не идет. Каталитические свойства продукта «мягкого» обжига были установлены и исследованы при использовании данного материала в качестве катализатора реакции конверсии этанола водяным паром, реакции водяного газа, конверсии каменного угля Кузнецкого бассейна [15].

Немагнитная часть продукта переработки высокомагнезиальных сидеритов (табл. 1) имеет относительно невысокое содержание основного оксида MgO и высокое содержание примесных оксидов SiO_2 и CaO, образующих легкоплавкие соединения, поэтому такой материал не может быть использован для производства высококачественной огнеупорной продукции. Данный недостаток, однако, можно использовать как преимущество при производстве магнезиальных флюсов для модификации сталеплавильных шлаков, например для производства брикетированного флюса МГФ (магнезиальный глиноземистый флюс), введение которого снижает агрессивное воздействие шлака на футеровку кислородного конвертера [16]. Основные блоки существующей и предлагаемой технологии приведены на рис. 1.

Заключение. В статье рассмотрены результаты исследований процессов комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья, базирующихся как на термомеханических способах обогащения, так и на процессах селективного выщелачивания без применения сильных кислот. Сочетание

термомеханического обогащения и выщелачивания позволяет повысить содержание железа в концентрате на 7 %, получать до 100–120 кг/т концентрата высокоактивной магнезии с содержанием не менее 98 % оксида магния, а также варьировать структуру, фазовый и химический состав продукта обогащения, что делает возможным его применение в качестве готового катализатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рошин В. Е., Салихов С. П., Поволоцкий А. Д. Твердофазное предвосстановление железа – основа безотходных технологий переработки комплексных руд и техногенных отходов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Металлургия. 2016. Т. 16. № 4. С. 78–84.
2. Юрьев Б. П., Шешуков О. Ю., Дудко В. А. Разработка экологически чистой технологии обогащения сидеритовых руд // Черная металлургия. 2019. Т. 75. № 8. С. 923–930.
3. Dziubinska B., Narebski W. Siderite concretions in paleocene series of polish part of the eastern flysch Carpathians // Mineralogia Polonica. 2004. Vol. 35. No. 2. P. 79–91.
4. Bai S. J., Wen S. M., Liu D. W., Zhang W. B. Carbothermic reduction of siderite ore with high phosphorus content reinforced by sodium carbonate // Canadian Journal of Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 51. No. 4. P. 376–382.
5. Wills B. A., Finch J. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth–Heinemann, 2015. 498 p.
6. Вайсберг Л. А., Сафронов А. Н. О применении вибрационной дезинтеграции для переработки различных материалов // Обогащение руд. 2018. № 1. С. 3–11.
7. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 19–24.
8. Yin W., Tang Y. Interactive effect of minerals on complex ore flotation: a brief review // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2020. Vol. 27. P. 571–583.
9. Леонтьев Л. И., Ватолин Н. А., Шаврин С. В., Шумаков Н. С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М.: Металлургия, 1997. 432 с.
10. Курков А. В., Кольцов В. Ю., Щербакова С. Н., Величина Н. С., Кузнецов И. В., Сотсков К. В. Применение пиро- и гидрометаллургических технологий для очистки Бакальских сидероплезитовых руд от магния // Плаксинские чтения: матер. Междунар. совещания. 2009. С. 198–199.
11. Клочковский С. П., Смирнов А. Н., Савченко И. А. Разработка физико-химических основ комплексного использования высокомагнезиальных сидеритов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 1(49). С. 26–31.
12. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам: монография / Б. П. Юрьев [и др.]. Екатеринбург: День РА, 2016. 428 с.
13. Luo Y. H., Zhu D. Q., Pan J., Zhou X. L. Thermal decomposition behavior and kinetics of Xinjiang siderite ore // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2016. Vol. 15. No. 1. P. 17–25.
14. Смирнов А. Н., Великанов В. С., Гришин И. А., Масалимов А. В. Изучение возможности переработки отходов обогащения магнезита с получением высокоактивной магнезии // Горная промышленность. 2018. № 6(142). С. 83–85.
15. Smirnov A. N., Klochkovsky S. P., Krylova S. A., Sysoev V. I. Gasification of the kuznetsk basin coal concentrate using oxide iron-magnesium catalysts // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019. Vol. 54. No. 2. P. 286–291.
16. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / К. Н. Демидов [и др.]. Сатка: Уральский рабочий, 2013. 280 с.

Поступила в редакцию 16 сентября 2020 года

Сведения об авторах:

Смирнов Андрей Николаевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры металлургии и химических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: sman@magtu.ru

Клочковский Станислав Павлович – кандидат химических наук, доцент, научный сотрудник кафедры металлургии и химических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: klochkovskiy37@mail.ru

Крылова Светлана Александровна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры металлургии и химических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: svkryl@mail.ru

Сысоев Виктор Иванович – заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Study of high-magnesia iron ore feedstock integrated processing

Andrei N. Smirnov¹, Stanislav P. Klochkovskii¹, Svetlana A. Krylova¹, Viktor I. Sysoev¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Introduction. Iron and magnesium form a common lattice of the initial ore and its calcination products, which is the main obstacle limiting the widespread use of the ores of the Bakal group of deposits.

Research aim is to develop the physicochemical foundations of the integrated processing of high-magnesia siderite ores using pyro- and hydrometallurgy methods.

Research methodology is based on data analysis from thermogravimetry, X-ray and Mössbauer spectroscopy, and chromatography. The analysis made it possible to determine suitable conditions for heat treatment, leaching, chemical and phase composition, structure and properties of integrated processing products of high-magnesia iron ore raw materials.

Results. A new scheme for high-magnesia iron ore raw materials integrated processing has been proposed. Testing of the scheme in laboratory conditions has shown that it allows to increase the iron content in the concentrate by 7% and to obtain up to 100–120 kg per ton of highly active magnesia concentrate containing no less than 98% of magnesium oxide. It has been established that some products of the integrated processing are catalytically active in the processes of ethanol steam conversion and Kuznetsk Basin coal conversion, as well as in the water gas shift reaction.

Summary. The proposed scheme makes it possible to increase iron and related elements extraction degree, without changing the working conditions on the operating plants.

Key words: integrated processing of natural high-magnesia siderites; iron ore concentrate; magnesia; thermomechanical beneficiation; carbon dioxide; leaching; catalysis.

REFERENCES

1. Roshchin V. E., Salikhov S. P., Povolotskiy A. D. Solid-phase pre-reduction of iron as a basis of non-waste technologies of processing complex ores and industrial waste. *Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*. 2016; 16(4): 78–84. (In Russ.)
2. Iuriev B. P., Sheshukov O. Ju., Dudko V. A. The development of the environment friendly technology for the beneficiation of siderite ores. *Chernaia metallurgiya = Ferrous Metallurgy*. 2019; 75 (8): 923–30. (In Russ.)
3. Dziubinska B., Narebski W. Siderite concretions in paleocene series of polish part of the eastern flysch Carpathians. *Mineralogia Polonica*. 2004; 35(2): 79–91.
4. Bai S. J., Wen S. M., Liu D. W., Zhang W. B. Carbothermic Reduction of Siderite Ore with High Phosphorus Content Reinforced by Sodium Carbonate. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials*. 2012; 51(4): 376–82.
5. Wills B. A., Finch J. *Wills' Mineral Processing Technology: an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Butterworth-Heinemann; 2015.
6. Vaisberg L. A., Safronov A. N. Vibratory disintegration application in processing of different materials. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2018; 1: 3–11. (In Russ.)
7. Pelevin A. E. Increase of the quality of magnetite concentrates using alternating magnetic field. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2019; 6: 19–24. (In Russ.)
8. Yin W., Tang Y. Interactive Effect of Minerals on Complex Ore Flotation: a Brief Review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020; 27: 571–83.
9. Leontiev L. I., Vatolin N. A., Shavrin S. V., Shumakov N. S. *Pyrometallurgical Processing of Complex Ores*. Moscow: Metallurgiya Publishing; 1997. (In Russ.)
10. Kurkov A. V., Koltsov V. Iu., Shcherbakova S. N., Velichkina N. S., Kuznetsov I. V., Sotskov K. V. The use of pyro- and hydrometallurgical technologies for the purification of the Bakal siderite ores from magnesia. In: *The Proceedings of International Meeting "Plaksin Readings"*. 2009; 198–199. (In Russ.)
11. Klochkovskii S. P., Smirnov A. N., Savchenko I. A. The development of physico-chemical basics for the integrated processing of high-magnesia siderites. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2015; 49(1): 26–31.
12. Iuriev B. P. et al. *Technological and heat engineering basics of the preparation of siderite ores for the blast furnace smelting: monograph*. Ekaterinburg: Den RA Publishing; 2016. (In Russ.)
13. Luo Y. H., Zhu D. Q., Pan J., Zhou X. L. Thermal Decomposition Behavior and Kinetics of Xinjiang Siderite Ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016; 15(1): 17–25.
14. Smirnov A. N., Velikanov V. S., Grishin I. A., Masalimov A. V. The study on possibilities of the processing of the magnesite beneficiation waste with obtaining of highly active magnesia. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2018; 142(6): 83–85. (In Russ.)

15. Smirnov A. N., Klochkovsky S. P., Krylova S. A., Sysoev V. I. Gasification of the Kuznetsk Basin Coal Concentrate Using Oxide Iron-Magnesia Catalysts. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019; 54(2): 286–91.

16. Demidov K. N., et al. *High-magnesia fluxes for steel industry*. Satka: Uralskii rabochii Publishing; 2013. (In Russ.)

Received 16 September 2020

Information about authors:

Andrei N. Smirnov – DSc (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: sman@magtu.ru

Stanislav P. Klochkovskii – PhD (Chemistry), Associate Professor, researcher, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: klochkovskiysp37@mail.ru

Svetlana A. Krylova – PhD (Chemistry), associate professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: svkryl@mail.ru

Viktor I. Sysoev – Head of Laboratory, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: viktor.sysoev.86@yandex.ru

Для цитирования: Смирнов А. Н., Клочковский С. П., Крылова С. А., Сысоев В. И. Исследование процессов комплексной переработки высокомагнезильного железорудного сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 62–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-62-70

For citation: Smirnov A. N., Klochkovskii S. P., Krylova S. A., Sysoev V. I. Study of high-magnesia iron ore feedstock integrated processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 8: 62–70 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-62-70