

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВPHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES

УДК 669.046.582.5

DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-597-603



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ БОРНОГО АНГИДРИДА
НА ВЯЗКОСТЬ ШЛАКОВ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО
СИДЕРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТАА. С. Вусихис¹, Л. И. Леонтьев^{1, 2, 3}, М. А. Михеенков¹¹ Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)³ Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

✉ vas58@mail.ru

Аннотация. Бакальское месторождение, расположенное на Южном Урале вблизи города Бакал Челябинской области, является одним из крупнейших месторождений карбонатных железных руд (сидеритов). Общие запасы сидеритов составляют около 1 млрд т. Они не пользуются спросом у металлургов из-за низкого содержания железа и высокого содержания магния. В то же время металлургические предприятия Урала испытывают дефицит железорудного сырья, в том числе сталеплавильного. Высокая чистота сидеритов по фосфору и цветным металлам позволяет использовать для их переработки методы бескоксовой металлургии. Пирометаллургическое обогащение сидеритов, включающее их восстановительный обжиг во вращающейся печи с последующим измельчением и магнитной сепарацией, позволяет получить концентрат со степенью металлизации более 90 % и содержанием пустой породы менее 3–7 %, пригодный в качестве сырья для сталеплавильного производства. Расчеты показали, что затраты электроэнергии на плавку металлического лома и металлизированного сидеритового концентрата, содержащего 30 % пустой породы, и загружаемого в печь при температуре выше 1000 °С, близки. Предложен способ переработки сидеритов, включающий восстановление исходной руды во вращающейся печи и плавку получаемого металлизированного концентрата, в горячем виде (при температуре выше 1000 °С) загружаемого в сталеплавильную печь. Пустая порода металлизированного сидеритового концентрата содержит большое количество оксида магния, что делает ее тугоплавкой. Для получения жидкого шлака предложено использовать добавку борного ангидрида в виде колеманита. Для оценки влияния B_2O_3 на плавление оксидной фазы металлизированного сидерита в процессе электроплавки проведены исследования корреляции вязкости магниезависимого сталеплавильного шлака, содержащего B_2O_3 , с температурой и его составом. Обнаружено, что при температуре выпуска (1600 °С) образующийся магниезависимый шлак обладает низкой вязкостью (менее 3,65 Пз) при соотношении MgO/SiO_2 в исходном сидерите, равном 0,75–1,25.

Ключевые слова: железорудное сырье, бакальские сидериты, обогащение руды, обжиг, металлизация, вязкость, шлак, колеманит, оксид бора

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-29-00400.

Для цитирования: Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Михеенков М.А. Влияние борного ангидрида на вязкость шлаков электроплавки металлизированного сидеритового концентрата. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(5):597–603.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-597-603>

EFFECT OF BORIC ANHYDRIDE ON VISCOSITY OF SLAGS
USED IN ELECTRIC MELTING OF METALLIZED SIDERITE CONCENTRATEA. S. Vusikhis¹, L. I. Leont'ev^{1, 2, 3}, M. A. Mikheenkova¹¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)² National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)³ Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

✉ vas58@mail.ru

Abstract. The Bakal deposit located in the Southern Urals near the city of Bakal, Chelyabinsk region, is one of the largest deposits of carbonate iron ores (siderites). The total deposit of siderites is about 1 billion tons. They are not in demand among metallurgists because of their low iron content and high

magnesium content. At the same time, the Urals metallurgical enterprises are suffering from shortage of iron ore raw materials including steelmaking ore raw materials. The high purity of siderites in terms of phosphorus and non-ferrous metals makes it possible to use methods of coke-free metallurgy for their processing. Pyrometallurgical processing of siderites including their reduction roasting in a rotary furnace followed by grinding and magnetic separation allows obtaining a concentrate to be used as a steelmaking raw material having metallization degree above 90 % and a waste rock content under 3 – 7 %. Calculations showed that the costs of electricity used for melting scrap metal and metallized siderite concentrate containing 30 % of waste rock and loaded into the furnace at temperatures above 1000 °C are close. We propose a siderite processing method including reduction of the initial ore in a rotary furnace, and melting of resulting metallized concentrate hot loaded (at temperatures above 1000 °C) into a furnace. The empty rock of metallized siderite concentrate contains a large percentage of magnesium oxide that makes it refractory. To obtain liquid slag, it is proposed to add boric anhydride in the form of colemanite. To assess the B_2O_3 effect on melting of the metallized siderite oxide phase in the process of electric melting, studies on the viscosity correlation of the magnesian steelmaking slag containing B_2O_3 with temperature and its composition were carried out. It was found that at the discharge temperature (1600 °C) the resulting magnesia slag with the ratio of MgO/SiO_2 in the initial siderite equaling to 0.75 – 1.25 has a low viscosity (less than 3.65 P).

Keywords: iron ore raw materials, Bakal siderites, ore processing, roasting, metallization, viscosity, slag, colemanite, boron oxide

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-29-00400.

For citation: Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Mikheenkova M.A. Effect of boric anhydride on viscosity of slags used in electric melting of metallized siderite concentrate. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):597–603. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-597-603>

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения карбонатных (сидеритовых) железных руд расположены по всему миру: Австрия, Болгария, Великобритания, Германия, Польша (Европа); Китай, Россия, Япония (Азия); Алжир (Африка); США, Канада, Колумбия (Америка) и многие другие страны [1 – 10]. В настоящее время единственный металлургический передел, в котором используют сидеритовые руды, это доменная плавка. Перед загрузкой в печь сидериты обогащают. В зависимости от состава руды для этого используют различные методы обогащения: гравитационное, флотационное, магнитное, электростатическое, обжиг-магнитное. К таким рудам относится одно из крупнейших в мире месторождений сидеритовой руды – Бакальское, расположенное на Южном Урале вблизи города Бакал Челябинской области. Общие запасы сидеритов составляют около 1 млрд т [11; 12]. Они обладают низким качеством (низкое содержание железа и высокое содержание оксида магния), поэтому пользуются незначительным спросом у металлургов-доменщиков. Добыча руды значительно меньше, чем это позволяют горно-геологические условия. В то же время металлургия Урала испытывает острый дефицит сырья, в том числе для сталеплавильного производства.

Бакальские сидериты отличаются наличием марганца (до 2 %), низким содержанием фосфора (менее 0,02 %) и отсутствием цветных металлов (меди и цинка). Это делает их ценным сырьем для производства сталей высокого качества с использованием методов бескоксовой металлургии [13; 14].

Методы прямого получения железа зависят от качества используемого железорудного сырья. Процесс восстановления богатых концентратов, содержащих не менее 70 % железа, проводят в различных агрегатах (шахтных печах, ретортах и др.) до степени их металлизации выше 90 % специальной газовой смесью [15]. Для переработки бедных руд широко применяют способы, включающие их металлизацию твердым восстановителем во вращающихся печах с последующим

отделением пустой породы путем измельчения и магнитной сепарации [16]. Многочисленные исследования показывают, что в результате такого пирометаллургического обогащения сидеритовых руд [11; 12] может быть получен концентрат со степенью металлизации более 90 %, содержание пустой породы в котором не превышает 3 – 7 %, пригодный для сталеплавильного производства [17]. Для ведения процесса восстановления при температурах 1300 – 1350 °C предварительно методом гравитационного обогащения в тяжелых суспензиях [10], полиградиентной магнитной сепарацией или рентгенорадиометрическим методом [18] легкоплавкая пустая порода, представленная сланцами кварцево-глинистого состава [19], должна быть удалена.

Сравнение энергоемкости плавки в электропечи металлолома и нагретого до 1000 °C металлизированного сидеритового концентрата, содержащего порядка 30 % пустой породы, показало, что затраты электроэнергии в пересчете на 1 т железа в обоих случаях близки. Это позволяет предложить технологию плавки металлизированного сидеритового концентрата, полученного методом пирометаллургического обогащения во вращающейся печи, в которой стадии измельчения и магнитной сепарации отсутствуют. Однако необходимо учесть, что из-за высокого содержания оксида магния в оксидной фазе концентрата образующийся в ходе плавки шлак будет обладать высокой температурой плавления, что делает предложенную технологию неэффективной.

Известно, что добавка в шлак борного ангидрида снижает температуру его плавления [20]. Для оценки влияния B_2O_3 на плавление оксидной фазы металлизированного сидерита в процессе электроплавки проведены исследования корреляции вязкости магниезаменного сталеплавильного шлака, содержащего B_2O_3 , с температурой и его составом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования вязкости использован вибрационный вискозиметр, работающий на затухающих

Таблица 1

Химический состав исходных смесей

Table 1. Chemical composition of the initial mixtures

Номер смеси	Содержание, %						
	SiO ₂ /MgO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO
1	0,50	10,0	24,0	4,0	7,0	48,0	7,0
2	0,75	10,0	30,9	4,0	7,0	41,1	7,0
3	1,00	10,0	36,0	4,0	7,0	36,0	7,0
4	1,25	10,0	40,0	4,0	7,0	32,0	7,0

колебаниях с компьютерной обработкой полученных данных [21].

В зависимости от места залегания сидеритов доля большинства оксидов (железа, кальция алюминия, марганца), содержащихся в них, меняется незначительно, тогда как соотношение оксида кремния к оксиду магния может колебаться от 0,5 до 1,25 [11; 12]. Поэтому для исследований вязкости из чистых оксидов готовили исходные смеси, состав которых соответствовал составу оксидной фазы металлизированного сидеритового концентрата со степенью металлизации 95 %, с постоянной долей большинства оксидов и соотношением SiO₂/MgO, меняющимся в интервале от 0,5 до 1,25 (табл. 1). К ним добавляли материал, предварительно проплавленный и измельченный, по составу близкий к прокаленному колеманиту и содержащий 8 % SiO₂, 34 % CaO, 4 % MgO, 54 % B₂O₃ в количестве, равном его доле в шихте 10, 15 и 20 %. Это соответствует 60, 90 и 120 кг сырого колеманита (п.п.п. 30 %) на 1 т металлизированного сидеритового

концентрата. Химический состав исследуемых шлаков представлен в табл. 2.

Из смесей, соответствующих составу исследуемых шлаков, брикетировали таблетки, помещали их в молибденовый тигель, нагревали в электропечи сопротивления до 1600 °С и измеряли вязкость.

Проведенные исследования показали, что шлаки 1 – 3, в которых отношение SiO₂/MgO равно 0,5, при температурах ниже 1600 °С гетерогенны. В остальных шлаках можно выделить высоко- и низкотемпературные области вязкости. В высокотемпературной области значения вязкости менее 3,65 Пз. При уменьшении температуры она растет незначительно. В низкотемпературной области изменение вязкости происходит более круто. Увеличение отношения SiO₂/MgO и доли колеманита в смеси приводит к росту содержания B₂O₃ в шлаке, уменьшает температуру перехода вязкости в высокотемпературную область. Результаты измерений представлены на рис. 1.

Вязкости шлаков, соответствующие переходу из низкотемпературной области в высокотемпературную, и температуры перехода были проанализированы методами планирования эксперимента [22] с использованием ортогонально плана 2³. В качестве первого фактора при варьировании химического состава шлаков принято соотношение SiO₂/MgO, в качестве второго фактора – доля колеманита в шихте. План проведения эксперимента и его результаты приведены в табл. 3 и на рис. 2 – 4.

На рис. 2 приведен общий вид функции отклика вязкости шлака и температуры, при которой достигается требуемая вязкость, в зависимости от соотношения SiO₂/MgO и содержания колеманита.

Таблица 2

Химический состав исследуемых шлаков

Table 2. Chemical composition of the studied slags

Номер шлака	SiO ₂ /MgO	Доля колеманита, %	Содержание, %						
			FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	B ₂ O ₃
1	0,50	10,0	9,1	22,5	3,7	9,5	44,0	6,4	4,9
2	0,50	15,0	8,7	21,9	3,5	10,5	42,3	6,1	7,0
3	0,50	20,0	8,3	21,3	3,4	11,5	40,7	5,8	8,9
4	0,75	10,0	9,1	28,8	3,7	9,5	37,7	6,4	4,9
5	0,75	15,0	8,7	27,9	3,5	10,5	36,3	6,1	7,0
6	0,75	20,0	8,3	27,1	3,4	11,5	34,9	5,8	8,9
7	1,00	10,0	9,1	33,5	3,7	9,5	33,1	6,4	4,9
8	1,00	15,0	8,7	32,3	3,5	10,5	31,8	6,1	7,0
9	1,00	20,0	8,3	31,3	3,4	11,5	30,7	5,8	8,9
10	1,25	10,0	9,1	37,1	3,7	9,5	29,5	6,4	4,9
11	1,25	15,0	8,7	35,8	3,5	10,5	28,3	6,1	7,0
12	1,25	20,0	8,3	34,7	3,4	11,5	27,3	5,8	8,9

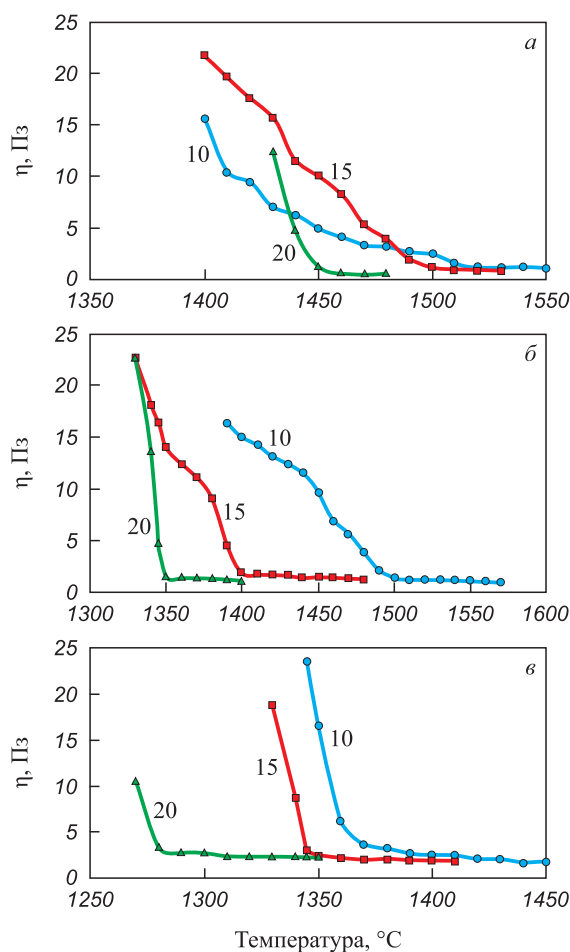


Рис. 1 Изменение вязкости сталеплавильного шлака в зависимости от температуры (цифры у кривых – процент колеманита) при SiO_2/MgO : 0,75 (а); 1,00 (б); 1,25 (в)

Fig. 1. Change in viscosity of steelmaking slag depending on temperature (numbers near curves – percentage of colemanite) at SiO_2/MgO : 0.75 (a); 1.00 (б); 1.25 (в)

Таблица 3

План проведения эксперимента и его результаты

Table 3. Plan of the experiment and its results

Номер опыта	SiO_2/MgO	Доля колеманита, % (по массе)	Температура, °C	Вязкость, Пз
1	0,75	10	1520	1,64
2	0,75	15	1500	1,24
3	0,75	20	1450	1,30
4	1,00	10	1500	1,43
5	1,00	15	1400	1,85
6	1,00	20	1350	1,50
7	1,25	10	1370	3,23
8	1,25	15	1345	2,24
9	1,25	20	1280	3,65
10	1,00	15	1400	1,85

На рис. 3 представлены изолинии равной вязкости шлака и температуры, при которой достигается требуемая вязкость в зависимости от соотношения SiO_2/MgO и содержания колеманита.

Анализ данных рис. 2 и 3 показывает, что в зависимости от соотношения SiO_2/MgO и содержания колеманита вязкость меняется экстремально. Минимальная вязкость шлака на рис. 3 отмечена точкой А. Она достигается при соотношении SiO_2/MgO , равном 0,78 и содержании колеманита 17 %. При равном соотношении SiO_2/MgO с увеличением содержания колеманита температура, при которой достигается требуемая вязкость, снижается. Температура, при которой достигается минимальная вязкость при соотношении SiO_2/MgO , равном 0,78, и его содержании 17 %, составляет 1460 °C.

Обработка результатов эксперимента с помощью программы STATISTICA [24] позволила рассчитать уравнения регрессии, которые описывают поведение

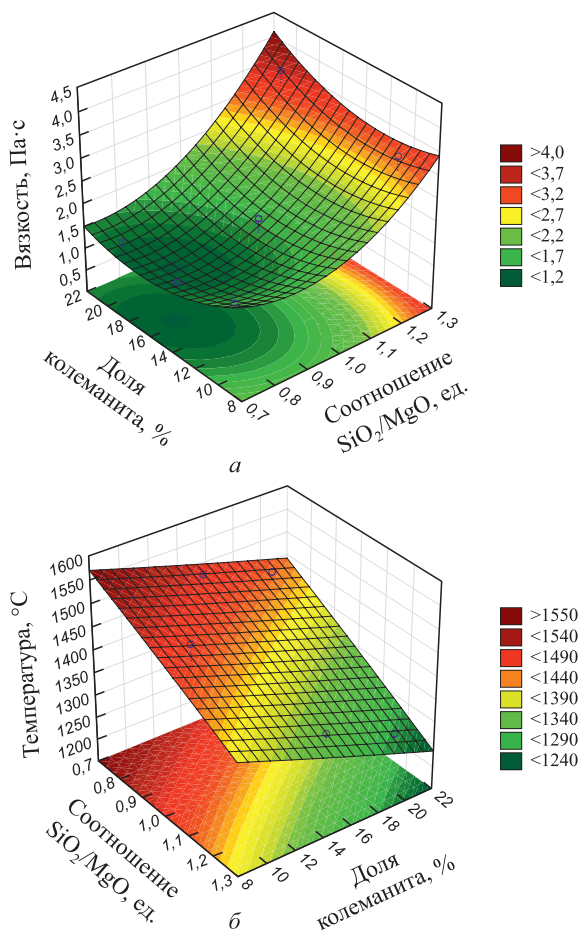


Рис. 2. Общий вид функции отклика вязкости шлака (а) и равной температуры, при которой достигается требуемая вязкость (б), в зависимости от соотношения SiO_2/MgO и доли колеманита в шихте

Fig. 2. General view of slag viscosity response function (a) and equal temperature at which the required viscosity is achieved (б), depending on SiO_2/MgO ratio and proportion of colemanite in the charge

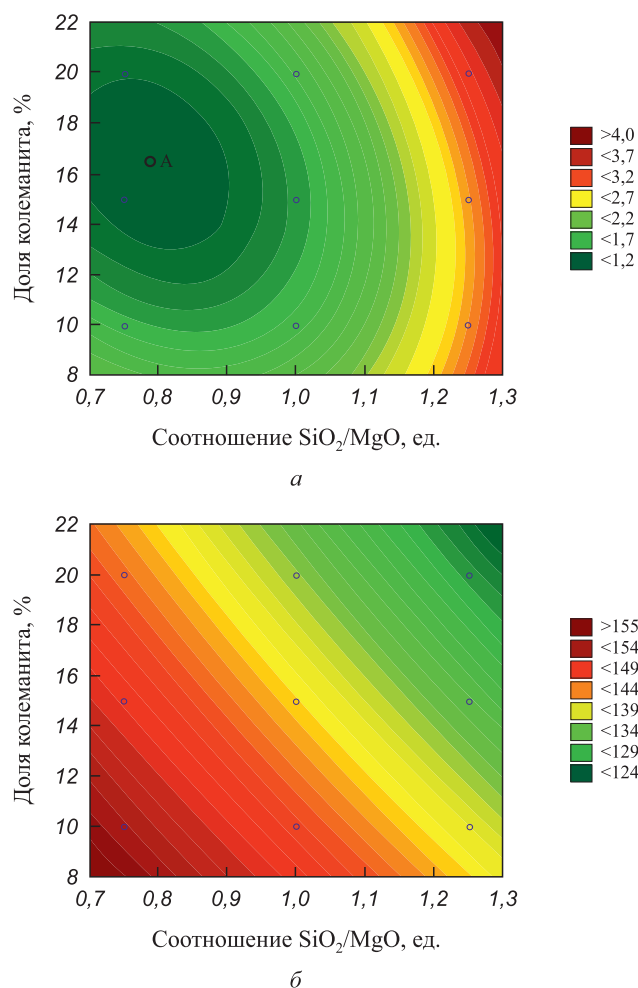


Рис. 3. Изолинии равной вязкости шлака (а) и равной температуры, при которой достигается требуемая вязкость (б), в зависимости от соотношения SiO_2/MgO и доли колеманита в шихте

Fig. 3. Isolines of equal slag viscosity (a) and equal temperature at which the required viscosity is achieved (b), depending on SiO_2/MgO ratio and proportion of colemanite in the charge

функции отклика (вязкости (1) и температуры (2)) в зависимости от основных факторов:

$$\eta = 10,93 - 15,58x + 8,3x^2 - 0,4y + 0,009y^2 + 0,15xy; \quad (1)$$

$$T = 1801,7 - 199,5x - 28,6x^2 - 7,19y + 0,03y^2 - 4,0xy; \quad (2)$$

где x – соотношение SiO_2/MgO , ед.; y – содержание колеманита, % (по массе).

Для оценки адекватности модели, рассчитанной при помощи уравнения регрессии, осуществлялось сравнение экспериментальных и расчетных значений вязкости и температуры. Результаты проверки методом корреляции экспериментальных и расчетных данных представлены на рис. 4. По полученным данным видно, что уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента, поскольку практически все экспериментальные данные располагаются в доверительном интервале, ограниченном эллипсом надежности критерия.

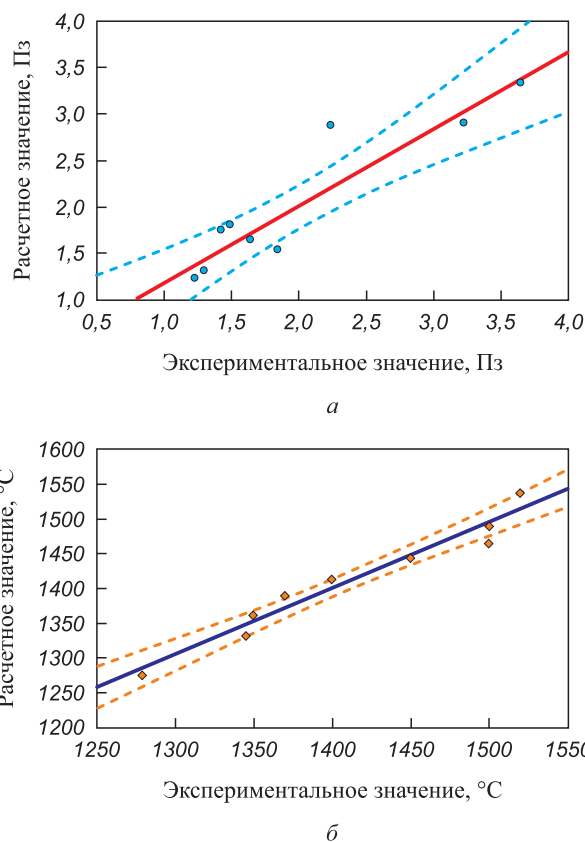


Рис. 4. Диаграмма корреляции экспериментальных и расчетных значений вязкости (а) и температуры (б)

Fig. 4. Correlation diagram of experimental and calculated values of viscosity (a) and temperature (b)

Таким образом установлено, что при соотношении $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 0,5$ добавка колеманита не приводит к положительным результатам. При температурах ниже 1600°C шлак остается гетерогенным, что не позволяет провести плавки металлизированного сидерита в электропечах. В шлаках с соотношением SiO_2/MgO более 0,75 наблюдается высокотемпературная область с вязкостью менее 3,65 Пз, соответствующая температурам выше 1520°C при доле колеманита 10 – 20 %. Температуру перехода из высокотемпературной в низкотемпературную область можно регулировать, меняя соотношение SiO_2/MgO и долю колеманита. Одна и та же температура перехода может быть достигнута при одновременном увеличении SiO_2/MgO и снижении доли колеманита.

Выводы

Восстановленный во вращающейся печи до степени металлизации 95 % кусковой сидеритовый концентрат, в горячем виде (при температурах выше 1000°C) загруженный в электропечь с добавками сырого колеманита в количестве 60 – 120 кг/т концентрата, может быть проплавлен с получением при температурах на выпуске (около 1600°C) металла-полупродукта, пригод-

ного для дальнейшего получения стали, и гомогенного магнезиального шлака, обладающего низкой вязкостью (менее 3,65 Пз) при соотношении MgO/SiO_2 в исходном сидерите, равном 0,75 – 1,25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Frimmel H. Strontium isotopic evidence for the origin of siderite, ankerite and magnesite mineralizations in the Eastern Alps. *Mineralium Deposita*. 1988;23(4):268–275. <https://doi.org/10.1007/BF00206407>
2. Pohl W. Comparative geology of magnesite deposits and occurrences. In: *Magnesite. Geology, Mineralogy, Geochemistry, Formation of Mg-Carbonates*. Moeller P. ed. Monogr. Ser. Mineral Deposits. 1989;28:1–13.
3. Jonkov J., Mochev D., Grigorova I., Nishkov I. Siderite ore physical separation and reverse flotation. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. 2012;48:23–37.
4. Boch R., Wang X., Kluge T., etc. Aragonite–calcite veins of the ‘Erzberg’ iron ore deposit (Austria): Environmental implications from young fractures. *Sedimentology*. 2019;66(4):604–635. <https://doi.org/10.1111/sed.12500>
5. Min L., Zhiming C., Qiying C. The role of organic matter in the formation of siderite from Xuanlong area, Hebei Province. *Chinese Journal of Geochemistry*. 1997;16: 86–94. <https://doi.org/10.1007/BF02843376>
6. Bai S., Wen S., Liu D., Zhang W., Xian Y. Catalyzing carbo-thermic reduction of siderite ore with high content of phosphorus by adding sodium. *ISIJ International*. 2011;51(10): 1601–1607. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1601>
7. Shikazono N. Composition of siderite and the environments of formation of vein-type deposits in Japan. *Economic Geology*. 1977;72(4):632–641. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.4.632>
8. Palinkas S.S., Spangenberg J.E., Palinkas L.A. Organic and inorganic geochemistry of Ljubija siderite deposits, NW Bosnia and Herzegovina. *Mineralium Deposita*. 2009;44: 893–913. <https://doi.org/10.1007/s00126-009-0249-z>
9. Rudmin M.A., Kalinina N.A., Maximov P.N. Formation of siderite in marine ooidal ironstones on example of Bakchar Deposit (Western Siberia). In: *Proceedings of the X Int. Siberian Early Career Geoscientists Conf. Novosibirsk State University*; 2022:79–80.
10. Жунев А.Г., Юрьев Б.П., Бланк М.Э. Интенсификация процессов обжига и агломерации сидеритовых руд. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации*. 1988;(3):2–13.
Zhunev A.G., Yur'ev B.P., Blank M.E. Intensification of roasting and agglomeration of siderite ores. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 1988;(3):2–13. (In Russ.).
11. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам. *Монография* / Б.П. Юрьев, С.Г. Меламуд, Н.А. Спирин, В.В. Шацилло. Екатеринбург: День РА; 2016:428.
12. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. *Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали. Монография*. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2022:116.
13. Лаптева А. Бескоксовая металлургия: ресурсы, состояние, перспективы. *Металлы Евразии*. 2012;(2):9–23.
14. Кириченко И.С., Алексахин А.В., Развитие мирового и отечественного производства железа прямого восстановления. *Молодой ученый*. 2016;(2):85–90.
Kirichenko I.S., Aleksakhin A.V. Development of global and domestic production of direct reduced iron. *Molodoi uchenyi*. 2016;(2):85–90. (In Russ.).
15. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Плющевский И.Н., Корнеев С.В. Перспективы производства и использования металлизированного сырья для получения высококачественных марок стали. Сообщение 1. Анализ современных схем получения металлизированного сырья. *Литье и металлургия*. 2009;1(50):134–138.
Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Plyushchevskii I.N., Korneev S.V. Prospects for the production and use of metallized raw materials to obtain high-quality steel grades. Message 1. Analysis of modern schemes for obtaining metallized raw materials. *Lit'e i metallurgiya*. 2009;(50):134–138. (In Russ.).
16. Курунов И.Ф., Савчук Н.А. *Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа*. Москва: Черметинформация; 2002:198.
17. Гиммельфарб А.И., Неменов А.М., Тарасов Б.Е. *Металлизация и электроплавка железорудного сырья*. Москва: Металлургия; 1981:152.
18. Юрьев Б.П., Шешуков О.Ю., Дудко В.А. Разработка экологически чистой технологии обогащения сидеритовых руд. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019;75(8):923–929. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-923-929>
Yur'ev B.P., Sheshukov O.Yu., Dudko V.A. Elaboration of an environmentally appropriate technology of siderite ores concentration. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019;75(8):923–929. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-923-929>
19. Ахлюстина А.И., Жуковский Г.В., Квасков А.П. Технологическая классификация железных руд Бакальского месторождения. *Труды «Уралмеханобр»*. 1972;18:37–43.
Akhlyustina A.I., Zhukovskii G.V., Kvaskov A.P. Technological classification of iron ores of the Bakal deposit. *Trudy "Uralmekhanobr"*. 1972;(18):37–43. (In Russ.).
20. Ren Sh., Zhang J., Wu L., Fu W., Rao J. Influence of B_2O_3 on viscosity of high Ti-bearing blast furnace slag. *ISIJ International*. 2012;52(6):984–991. <https://doi.org/10.1051/metal/2016038>
21. Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Dmitriev A.N., Chentsov V.P., Ryabov V.V. Structure sensitive properties of system B_2O_3 –CaO melts. *Defect and Diffusion Forum*. 2020;400:186–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.400.186>
22. Куприенко Н.В., Пономарева О.А., Тихонов Д.В. *Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение: Учебное пособие*. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета; 2009:138.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Семенович Вусихис, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», главный научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-4343-914X

E-mail: leo@presidium.ras.ru

Михаил Аркадьевич Михеенков, д.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: silast@mail.ru

Aleksandr S. Vusikhis, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Leopol'd I. Leont'ev, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS", Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-4343-914X

E-mail: leo@presidium.ras.ru

Mikhail A. Mikheenkova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory "Pyrometallurgy of Ferrous Metals", Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

E-mail: silast@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Вусихис – постановка задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов, проведение экспериментов.

Л. И. Леонтьев – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование статьи.

М. А. Михеенков – проведение расчетов.

A. S. Vusikhis – setting the research problem, calculations, writing the text, forming conclusions, conducting experiments.

L. I. Leont'ev – scientific guidance, analysis of the research results, editing.

M. A. Mikheenkova – calculations.

Поступила в редакцию 28.08.2023

После доработки 31.08.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Received 28.08.2023

Revised 31.08.2023

Accepted 04.09.2023