



Оригинальная статья

УДК 669.162.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-504-510

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2344>



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАКАЛЬСКИХ СИДЕРИТОВ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

А. С. Вусихис¹, Л. И. Леонтьев^{1,2,3}, С. Н. Агафонов¹

¹ Институт металлургии УрО 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)

Аннотация. Металлургические предприятия Урала испытывают дефицит железорудного сырья, который компенсируется использованием материалов, завозимых из Центральной России, Кольского полуострова и Казахстана. Замена их на местное сырье увеличит конкурентоспособность производимого на Урале металла, поэтому вопрос оценки возможности замены привозного сырья на местное является весьма актуальным. Таким сырьем могут быть сидеритовые руды Бакальского месторождения. Они не пользуются спросом у металлургов из-за низкого содержания железа и высокого магния. Расчеты доменной плавки, произведенные с помощью балансовой логико-статистической модели, показали, что добавки обожженного и металлизированного концентратов улучшают показатели. Однако с ростом сидеритов в шихте увеличивается содержание оксида магния в шлаке, что влияет на его вязкость и делает затруднительным или невозможным плавку с использованием более 20 % сидеритов. Для разжижения шлака предложено использовать оксид бора. С помощью термодинамического моделирования проведена оценка влияния добавок в шихту 1 – 3 % B_2O_3 на химический состав шлака и распределение бора между металлической и оксидной фазой. Показано, что в процессе плавки происходит восстановление бора из шлаковой фазы и его частичный переход в металл. Это вызывает уменьшение содержания B_2O_3 в конечном шлаке. Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показывает близкое содержание бора в металле, определенное теоретически и экспериментально. Это необходимо учитывать при расчете шихты. По расчетным данным основным восстановителем бора является кремний, а экспериментальные данные показывают, что им является углерод.

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

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

Для цитирования: Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Агафонов С.Н. Оценка эффективности использования бакальских сидеритов в доменной плавке // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 504–510. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>

Original article

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING BAKAL SIDERITES IN BLAST FURNACE SMELTING

A. S. Vusikhis¹, L. I. Leont'ev^{1,2,3}, S. N. Agafonov¹

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (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)

Abstract. Metallurgical plants in the Urals are experiencing a shortage of iron ore. This has been compensated by the use of materials imported from Central Russia, the Kola Peninsula and Kazakhstan. Replacing them with local resources would increase the competitiveness of the metal produced in the Urals, which makes the question of assessing the possibility of replacing imported resources with local ones very relevant. Siderite ores from the Bakal deposit could be such resources. They are not in demand among metallurgists because of their low iron and high magnesium content. Calculations of blast furnace smelting made with the help of a balance logical-statistical model showed that additions of calcined and metallized concentrates improve performance. However, with increasing amount of siderites in the charge, the content of magnesium oxide in the slag increases. This in turn affects the viscosity and makes it difficult or impossible to smelt using more than 20 % siderites. The use of boron oxide for slag liquefaction is proposed. Thermodynamic modeling has been used to evaluate the effect of adding 1 – 3 % B_2O_3 to the charge on chemical composition of the slag and the distribution of boron between the metallic and oxide phases. It is shown that in the process of smelting, Boron is reduced from the slag phase, resulting in its partial transition into metal. This causes a decrease in the B_2O_3 content in the final slag. A comparative analysis of the calculated and experimental data shows a similar content of boron in metal, which has been determined both theoretically and experimentally. This should be taken into account when calculating the charge. According to the data obtained, the main reducing agent of boron is silicon, while experimental data show that it is carbon.

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

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

For citation: Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Agafonov S.N. Assessment of the efficiency of using Bakal siderites in blast furnace smelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 504–510. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>

На Урале сосредоточено 14 % общих запасов железных руд России, что составляет 13,87 млрд т (из них категории $A + B + C_1$ – 8,51 млрд т), а их ежегодная добыча – 22 % от всероссийской [1]. В то же время, металлургические предприятия Урала испытывают дефицит железорудного сырья [2 – 6]. Руда собственной добычи составляет 50 – 60 %. Остальное количество материалов завозится из Центральной России (Михайловский, Лебединский горно-обогатительные комбинаты), Кольского полуострова (Костомукшский ГОК) и Казахстана (Соколовско-Сарбайский ГОК). Это связано с тем, что из 50 месторождений Урала, учтенных государственным балансом, эксплуатируется всего 23. В силу различных причин на многих месторождениях Урала разработка не производится совсем или осуществляется недостаточно интенсивно. В частности, в Челябинской области расположено Бакальское месторождение карбонатных (сидеритовых) железных руд. Его запасы по категориям $A + B + C_1 + C_2$ составляют около 1 млрд т [7 – 9]. Горно-геологические условия позволяют добывать ежегодно до 20 – 25 млн т руды. Реальная добыча во много раз меньше. Это связано со слабым интересом металлургов к этому сырью из-за его низкого качества. Содержание железа в сырой руде не превышает 36 % [10]. Обжиг-магнитное обогащение позволяет увеличить его до 50 % [11], а металлизация до 70 % [12, 13]. Однако везде сохраняется большое количество пустой породы из-за отсутствия эффективной технологии его удаления [14].

Поскольку постоянное повышение железнодорожных тарифов приводит к увеличению стоимости производимого на Урале металла, что снижает его конкурентоспособность, вопрос оценки возможности замены привозного сырья на местное является весьма актуальным.

С этой целью был проведен анализ эффективности использования сидеритовых руд Бакальского месторождения в доменной плавке путем сравнения показателей работы доменной печи № 9 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) (табл. 1) с результатами аналитических расчетов. В расчетах прогнозировалось изменение параметров плавки при частичной замене в рудной составляющей шихты, состоящей из смеси агломерата ММК и окатышей Соколовско-Сарбайского ГОКа (ССГОК), взятых в соотношении 2/1, на материалы, изготовленные из сидеритов по различным технологиям подготовки их к доменной плавке (табл. 2). Были использованы сырая сидеритовая руда (СС), концентрат, полученный в результате обжиг-магнитного обогащения (ОК) и концентраты, восстановленные до различной степени металлизации (МК).

Для проведения расчетов применялась математическая балансовая логико-статистическая модель [15], основанная на использовании тепловых и материальных балансов доменной плавки, закономерностей тепло- и массообмена, учитывающих кинетические факторы восстановления оксидов железа, температуры чугуна и шлака, а также статистических данных о влиянии различных факторов на показатели работы печи.

Результаты расчетов приведены на рис. 1. Из них следует, что показатели доменной плавки при увеличении количества сидеритов в шихте изменяются линейно.

Добавки сырого сидерита снижают производительность печи и увеличивают расход кокса. Это связано с тем, что из-за уменьшения среднего содержания железа в шихте для получения 1 т чугуна расходуется большее количество руды. Кроме того, процессу восстановления сырых сидеритов предшествует их декарбонизация [16], что сдвигает процесс в зону прямого восстановления и требует увеличения общего расхода теплоты.

Использование сырых сидеритов для замены привозного сырья малоэффективно. При использовании обожженного сидерита показатели плавки ухудшаются незначительно. Изменение не превышает 5,5 %. Замена на металлизованный концентрат приводит к улучшению показателей плавки, и чем выше металлизация, тем показатели выше. Это говорит о возможной эффективности замены при меньшей стоимости сидеритовых концентратов по сравнению с привозными материалами.

Однако при этом следует учитывать то, что одним из основных условий высокой эффективности доменной плавки является выбор оптимального шлакового режима. В связи с этим, к доменным шлакам предъявляются определенные требования. При температуре горна (1500 °C) они должны обладать:

- вязкостью $<0,3 - 0,35 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и $<5 \text{ Па} \cdot \text{с}$ на выпусках;
- легкоплавкостью;
- низкой температурой начала кристаллизации [17].

Пустая порода сидеритов, независимо от методов их подготовки, более чем на половину состоит из оксида магния, который в процессе плавки полностью переходит в шлак. По расчетам, при добавках 45 % сидеритов в шихту его содержание в шлаке составляет около 30 %.

Исследования свойств высокомагнезиальных доменных шлаков показали, что для ведения доменной плавки на бакальских сидеритах оптимальными являются шлаки с содержанием $\text{MgO} \sim 10 - 15 \%$ при основности $(\text{CaO}/\text{SiO}_2) = 0,8 - 1,0$, а по обессерива-

Таблица 1

Базовые показатели доменной плавки (A_0)

Table 1. Basic indicators of blast-furnace smelting (A_0)

Полезный объем печи, м³		2014	Чугун	
Производительность, т/сут		4390	состав, %	
Общий расход руды, кг/т чугуна		1660	Si	0,70
Агломерат ММК, кг/т чугуна		1110	Ti	0
Окатыши ССГОК, кг/т чугуна		550	S	0,02
Среднее содержание Fe, %		58,80	Mn	0,60
Общий расход флюса, кг/т чугуна		8	Ni	0
Общий расход кокса, кг/т чугуна		450	P	0,05
Выход пыли, кг/т чугуна		32	Fe	94,00
Потери металла, кг/т чугуна		20	C	4,50
Расход газообразного топлива, м³/т чугуна		97	температура, °C	1470
Дутье			Шлак	
количество	м³/т чугуна	1070	выход, кг/т чугуна	306
	м³/мин	3262	состав, %	
температура, °C		1064	SiO₂	35,10
влажность, г/м³		8	CaO	40,20
кислород	м³/т чугуна	26,4	MgO	8,70
	м³/мин	13 830	Al₂O₃	13,90
Колошниковый газ			TiO₂	0,30
выход, м³/т чугуна		1650	FeO	0,60
давление, атм		1,44	MnO	0,10
содержание в колошниковом газе, %	CO	24,2	R₂O	0,74
	CO₂	20,1	S	1,00
	H₂	7,8	CaO/SiO₂	1,14
температура, °C		187	Тепловой баланс, мДж/т чугуна	
теплотворная способность, кДж		3903	приход	10 250
степень использования	CO	0,45	расход	10 250
	H₂	0,43	Материальный баланс, кг/т чугуна	
Теоретическая температура горения, °C		2018	приход	3585
			расход	3585

ющей способности высокомагнезиальные шлаки не уступают обычным маломagneзиальным. При этом увеличение концентрации MgO до 15 – 20 % при той же основности не вызывает больших затруднений в ходе плавки. Такие шлаки кристаллизуются при температурах ниже 1350 °C и жидкоподвижны [18, 19]. Дальнейшее увеличение содержания оксида магния в шлаках делает их короткими и тугоплавкими. Шлак, содержащий 30 % MgO, при температуре 1400 °C будет находиться в твердом состоянии [13]. Это позволяет сделать вывод о том, что плавка на шихте, содержащей более 20 % MgO, затруднительна или невозможна. Однако известно [20, 21], что добавка в доменные шлаки оксида бора снижает их вязкость во всем диапазоне температур и делает их более длинными. Поскольку изучались

шлаки, содержащие менее 20 % MgO, можно только предположить, что и для шлаков с более высоким содержанием оксида магния эта тенденция сохранится. Для подтверждения данного предположения необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований.

Допуская возможность проведения доменной плавки при увеличении содержания оксида магния в шлаке до 30 % за счет добавок 20 – 45 % концентрата обжиг-магнитного обогащения, с помощью балансовой логико-статистической модели оценили влияние добавок 1 – 3 % B₂O₃ на ее ход.

Расчеты показывают, что показатели плавки меняются незначительно, в пределах 3 %. Производительность и среднее содержание железа уменьшаются, а расход

Химический состав рудных компонентов

Table 2. Chemical composition of ore components

Компонент	Агломерат ММК	Окатыши ССГОК	СС	ОК	МК 20 %	МК 40 %	МК 60 %	МК 80 %
			Обозначения на графиках					
			1	2	3	4	5	6
Fe _{общ.}	56,64	63,10	34,54	49,75	55,15	56,94	58,86	60,91
Fe _{мет.}	0	0	0	0	11,03	22,78	35,32	48,73
FeO	10,91	3,75	40,47	1,54	56,72	43,93	30,27	15,66
CaO	9,53	1,24	1,95	2,81	3,11	3,20	3,32	3,44
MgO	2,00	0,40	8,01	11,54	12,79	13,21	13,65	14,12
SiO ₂	5,72	5,31	7,20	10,37	11,50	11,87	12,27	12,70
Al ₂ O ₃	1,60	2,10	0,99	1,43	1,58	1,63	1,69	1,75
MnO	0,70	0,10	1,83	2,64	2,92	3,02	3,12	3,23
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
SO ₃	0,08	0,12	0	0,30	0,31	0,32	0,33	0,35
CaCO ₃	0	0	1,53	0	0	0	0	0
MgCO ₃	0	0	32,18	0	0	0	0	0
MnCO ₃	0	0	0,89	0	0	0	0	0
FeS ₂	0	0	0,60	0	0	0	0	0

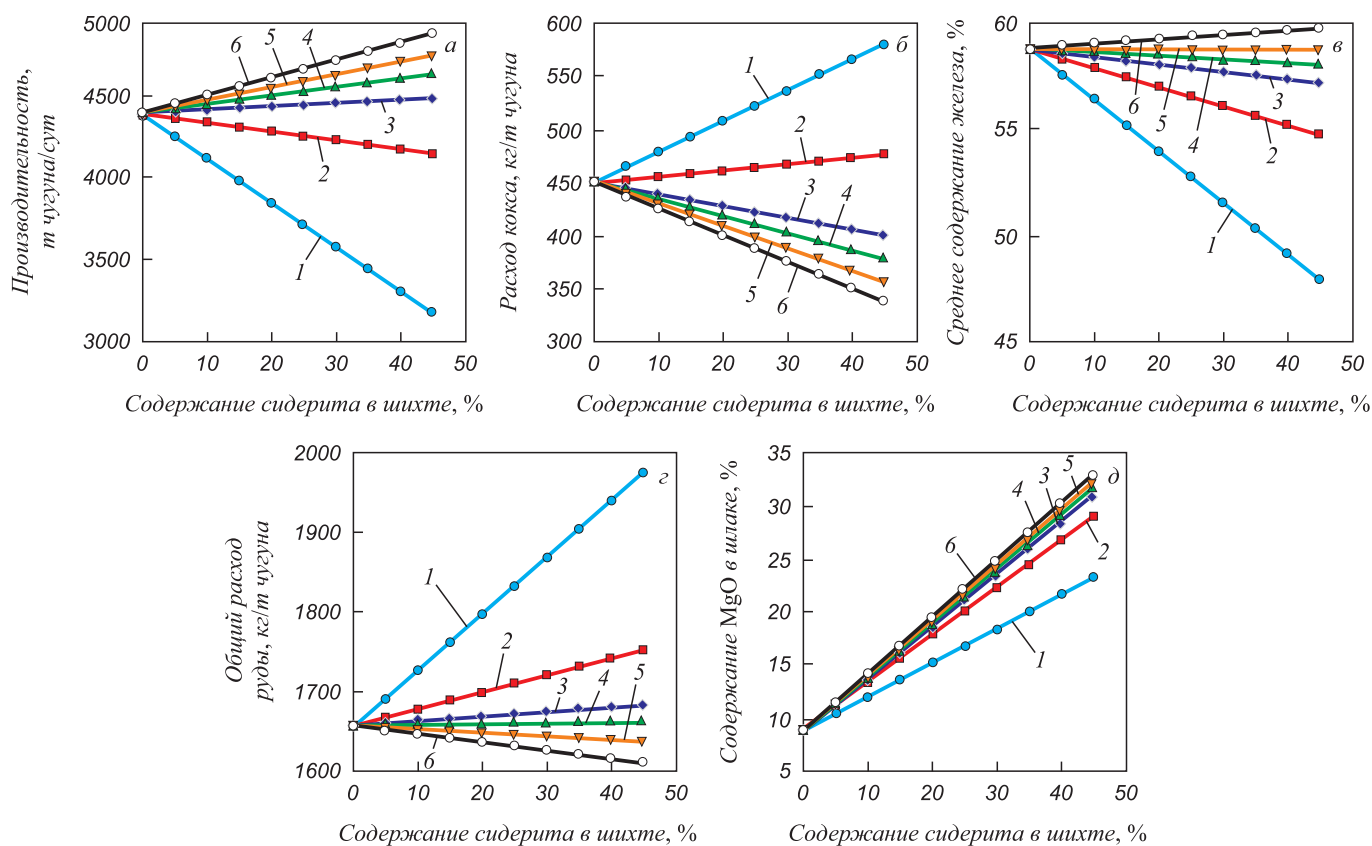


Рис. 1. Зависимость показателей доменной плавки от доли сидерита в шихте, %
 (используемый материал: 1 (■), 2 (●), 3 (◆), 4 (▲), 5 (▼), 6 (○) – см. табл. 2)

Fig. 1. Dependence of indicators of blastfurnace smelting on the proportion of siderite in the charge, %
 (material used: 1 (■), 2 (●), 3 (◆), 4 (▲), 5 (▼), 6 (○) – see Table 2)

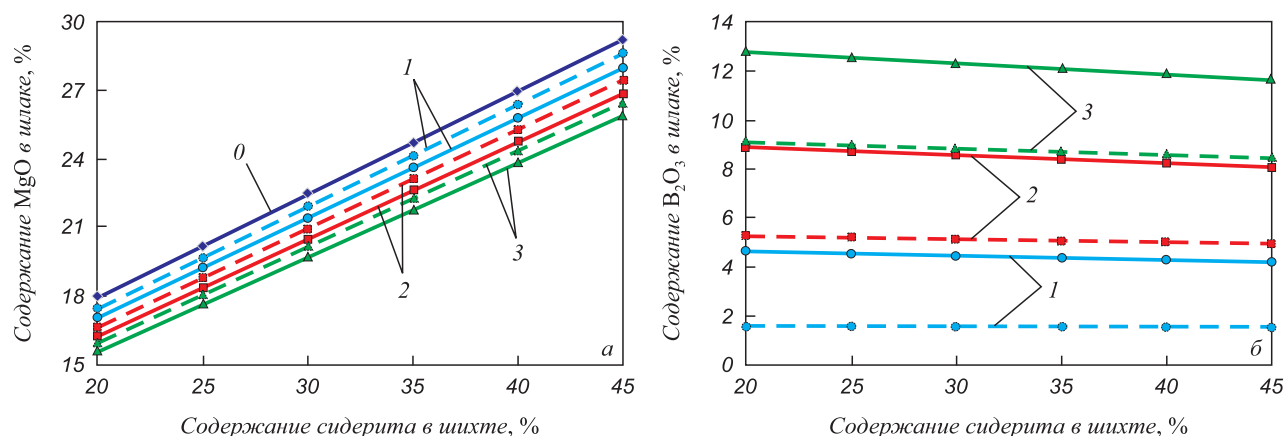


Рис. 2. Изменение содержания оксида магния и оксида бора в шлаке в зависимости от доли сидерита в шихте, % (цифры – содержание B_2O_3 в исходной шихте)

Fig. 2. Change in the content of magnesium oxide and boron oxide in the slag depending on the proportion of siderite in the charge, % (numbers – the content of B_2O_3 in the initial charge)

кокса и общий расход руды увеличиваются. Добавление B_2O_3 приводит к уменьшению содержания в шлаке всех оксидных составляющих, в том числе MgO , и появлению B_2O_3 (сплошные линии рис. 2).

Логико-статистическая модель не позволяет оценить распределение бора между металлом и шлаком. Для этого использовано термодинамическое моделирование с помощью программы ИВТАНТЕРМО [22].

В качестве рабочего тела выбрана система:

- 1 кг металла, содержащего 94,75 % Fe, 0,75 % Si, 4,5 % C;
- шлак, масса которого менялась в зависимости от доли в исходной рудной части сидерита и оксида бора от 360 до 450 г, содержащий от 31 – 36 % SiO_2 , 19 – 27 % CaO, 8,5 – 11,5 % Al_2O_3 , 4,4 – 12,8 % B_2O_3 (согласно данным расчетов по логико-статистической модели);
- среда – аргон, давление – 10^5 Па, температура – 1470 °C.

Для упрощения принято, что металлический и оксидный расплавы являются идеальными растворами. Расчеты показали, что независимо от доли сидеритов в шихте, при добавке к ней 1, 2, 3 % B_2O_3 , в металл переходит 0,36, 0,45, 0,49 % бора соответственно. Содержание B_2O_3 в шлаке уменьшается, а остальных компонентов, в том числе MgO , увеличивается (пунктирные линии рис. 2).

В работе [23] показано, что при добавке к рудной части шихты доменных печей ММК 20 % окатышей ССГОКа, содержащих 0,26 % B_2O_3 , количество бора в полученном чугуна составило 0,007 %, а B_2O_3 в шлаке – 0,12 %.

В связи с тем, что эти данные значительно отличаются от полученных расчетным путем в результате термодинамического моделирования, экспериментально оценено распределение бора между металлом и шлаком. Для этого путем переплава смеси оксидов в печи сопротивления с графитовым нагревателем (печь

Таммана) при температуре 1500 – 1550 °C получен синтетический шлак состава, %: 35,6 SiO_2 ; 21,1 CaO; 25,2 MgO ; 9,1 Al_2O_3 ; 8,3 B_2O_3 . Металлический сплав, содержащий 4,2 % C и 1,4 % Si, получен путем переплава железа с кремнием и углеродом в печи сопротивления с графитовым нагревателем в контролируемой атмосфере (Ar) при температуре 1550 °C (печь ТВВ). На следующем этапе проведен переплав полученного металлического продукта (чугун) с оксидным (шлак) из расчета 40 г шлака на 100 г чугуна. Состав шихты: чугун – 167,2 г; шлак – 66,8 г. Переплав чугуна и шлака проводили в печи сопротивления с графитовым нагревателем в контролируемой атмосфере (Ar) при температуре 1550 °C (печь ТВВ). В результате получен сплав на основе железа, содержащий, %: 2,8 C; 2,2 Si; 0,84 В и шлак состава, %: 40,2 SiO_2 ; 21,2 CaO; 25,3 MgO ; 9,1 Al_2O_3 ; 4,1 B_2O_3 . Для сравнения проведен термодинамический расчет равновесия рабочего тела того же состава и в тех же условиях. В результате получен металл, содержащий, %: 4,2 C; 0,2 Si; 0,6 В и шлак состава, %: 41,9 SiO_2 ; 21,0 CaO; 25,1 MgO ; 9,1 Al_2O_3 ; 3,0 B_2O_3 .

Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показывает близкое содержание бора в металле, определенное теоретически и экспериментально, а также, что восстановление бора вызывает уменьшение его содержания в конечном шлаке и это необходимо учитывать при расчете шихты. По расчетам основным восстановителем бора является кремний, а экспериментальные данные показывают, что им является углерод.

Выводы

Результаты аналитических расчетов, прогнозирующих параметры доменной плавки с помощью математической балансовой логико-статистической модели, по-

казали, что в результате использования сидеритов для замена части доменного привозного сырья образуется шлак с большим содержанием оксида магния. Это отрицательно скажется на его физико-химических свойствах, а именно: вязкости и температуре кристаллизации. В случае использования разжижающих флюсов и получения жидкоподвижного шлака, замена в шихте части привозного сырья на обжиг-магнитный или металли-

зованный концентрат, изготовленный из сидеритовой руды Бакальского месторождения, позволит снизить себестоимость получаемой продукции. Предполагается, что использование в качестве флюса материалов, содержащие оксид бора, позволит получить шлак с необходимыми свойствами. Показано теоретически и экспериментально, что в результате будет получен чугун с содержанием бора около 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Чернобровин В.П. Сырьевая безопасность черной металлургии России // *Пространство и Время*. 2011. № 3(5). С. 111–118.
2. Волков Ю.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Стратегия освоения сырьевых ресурсов Урала // *Горная Промышленность*. 2006. № 4. С. 57–62.
3. Волков Ю.В., Славиковский О.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Перспективы развития сырьевой базы горно-металлургических предприятий Урала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 5. С. 286–290.
4. Пахомов В.П., Душин А.В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УрФО // *Экономика региона*. 2008. № 3. С. 129–143.
5. Валиев Н.Г., Славиковский О.В., Славиковская Ю.О. Особенности освоения минерально-сырьевой базы на урбанизированных территориях Урала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. № 6. С. 344–347.
6. Корнилов С.В., Кантемиров В.Д. Железорудные месторождения Приполярного Урала как перспективная сырьевая база уральской металлургии // *Известия вузов. Горный журнал*. 2015. № 8. С. 22–28.
7. Эффективность и перспективы применения сидеритовых руд в доменной плавке / В.А. Красноборов, С.Л. Ярошевский, А.А. Денисов, В.С. Рудин, В.И. Бирючев, М.Ф. Полушкин. Донецк, 1996. 88 с.
8. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Спирин Н.А., Шацилло В.В. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам. Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2016. 428 с.
9. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 116 с.
10. Ахлюстина А.И., Жуковский Г.В., Квасков А.П. Технологическая классификация железных руд Бакальского месторождения // *Труды института «Уралмеханобр»*. 1972. № 18. С. 37–43.
11. Жунев А.Г., Федоренко Н.В., Червоткин В.В. и др. Окислительный обжиг сидеритовых руд в шахтных печах // *Окислование железных руд и концентратов*. Труды института «Уралмеханобр». 1976. № 3. С. 28–38.
12. Бланк М.Э., Червоткин В.В., Кончаковский В.Р. Разработка и исследование двухстадийного способа металлизации железорудного сырья в трехзонной шахтной печи // *Теория и практика прямого получения железа*. Москва: Наука, 1986. С. 207–211.
13. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Обоснование необходимости восстановления сидеритовой руды и разработка газовой схемы для получения восстановительного газа // *Сталь*. 2022. № 1. С. 2–6.
14. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. Москва: Металлургия, 1997. 432 с.
15. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Москва: Наука, 1991. 92 с.
16. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Гуляков В.С. Металлизация сидеритовой руды при восстановительном обжиге // *Металлы*. 2016. № 3. С. 8–13.
1. Chernobrov V.P. Raw material security of ferrous metallurgy in Russia. *Prostranstvo i vremya*. 2011, no. 3(5), pp. 111–118. (In Russ.).
2. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Strategy for development of the Urals raw material resources. *Gornaya promyshlennost'*. 2006, no. 4, pp. 57–62. (In Russ.).
3. Volkov Yu.V., Slavikovskii O.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Prospects for development of the raw material base of mining and metallurgical enterprises in the Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007, no. 5, pp. 286–290. (In Russ.).
4. Pakhomov V.P., Dushin A.V. Assessment of mineral and raw material security of the UFD. *Ekonomika regiona*. 2008, no. 3, pp. 129–143. (In Russ.).
5. Valiev N.G., Slavikovskii O.V., Slavikovskaya Yu.O. Peculiarities of mineral resource base development in urbanized territories of the Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2012, no. 6, pp. 344–347. (In Russ.).
6. Kornilov S.V., Kantemirov V.D. Iron ore deposits of the Subpolar Urals as a promising raw material base for the Urals metallurgy. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 22–28. (In Russ.).
7. Krasnoborov V.A., Yaroshevskii S.L., Denisov A.A., Rudin V.S., Biryuchev V.I., Polushkin M.F. *Efficiency and Prospects of Using Siderite Ores in Blast Furnace Smelting*. Donetsk, 1996, 88 p. (In Russ.).
8. Yur'ev B.P., Melamud S.G., Spirin N.A., Shatsillo V.V. *Technological and Thermal Engineering Bases of Siderite Ore Preparation for Metallurgical Processing: Monograph*. Yekaterinburg: ООО АМК «Den' RA», 2016, 428 p. (In Russ.).
9. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I. *Application of Siderite Ores in Iron and Steel Production: Monograph*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022, 116 p. (In Russ.).
10. Akhlyustina A.I., Zhukovskii G.V., Kvaskov A.P. Technological classification of iron ores of the Bakal deposit. In: *Proceedings of the Institute "Uralmexanobr"*. Sverdlovsk, 1972, no. 18, pp. 37–43. (In Russ.).
11. Zhuneev A.G., Fedorenko N.V., Chervotkin V.V., etc. Oxidative roasting of siderite ores in shaft furnaces. In: *Pelletizing of Iron Ores and Concentrates: Proceedings of the Institute "Uralmexanobr"*. Sverdlovsk, 1976, no. 3, pp. 28–38. (In Russ.).
12. Blank M.E., Chervotkin V.V., Konchakovskii V.R. Development and study of two-stage method of iron ore raw materials metallization in a three-zone shaft furnace. In: *Theory and Practice of Direct Production of Iron*. Moscow: Nauka, 1986, pp. 207–211. (In Russ.).
13. Yur'ev B.P., Dudko V.A. Rationale for reduction of siderite ore and development of gas scheme to produce reducing gas. *Stal'*. 2022, no. 1, pp. 2–6. (In Russ.).
14. Leont'ev L.I., Vatin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pyrometallurgical Processing of Complex Ores*. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
15. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balance Logical-Statistical Model of Blast Furnace Process*. Moscow: Nauka, 1991, 92 p. (In Russ.).
16. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Gulyakov V.S. Metallization of siderite ore in reducing roasting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, vol. 2016, no. 5, pp. 404–408.

<https://doi.org/10.1134/S0036029516050153>

17. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кулинов Д.З., Шешуков О.Ю. Анализ современных методов переработки сидеритовых руд // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 49–52.
18. Вяткин В.П., Гаврилюк Л.Я., Остроухов М.Я. и др. Опытные плавки с участием в шихте Бакальских сидеритов // Шлаковый режим доменных печей. Москва: Металлургия, 1961. 350 с.
19. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. Москва: Металлургия, 1974. 120 с.
20. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Ким А.С. Физические свойства борсодержащих доменных шлаков // Комплексное использование минерального сырья. 1996. № 3. С. 27–31.
21. Liu W., Pang Z., Wang J., Zuo H., Xue Q. Investigation of viscosity and structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ slag melt // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. No. 12. P. 17123–17130. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.268>
22. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. IVTANTHERMO for Windows – database on thermodynamic properties and related software // *Calphad*. 1999. Vol. 23. No. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(99)00023-1)
23. Акбердин А.А., Ким А.С. Доменная плавка на борсодержащих шлаках // Теория и практика производства чугуна: Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию КГМК «Криворожсталь». Кривой Рог, 2004. С. 146–149.
17. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Sheshukov O.Yu. Analysis of modern methods of siderite ore processing. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2011, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.).
18. Vyatkin V.P., Gavriluk L.Ya., Ostroukhov M.Ya., etc. Experimental smelts with Bakal siderites in charge. In: *Slag Mode of Blast Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1961, 350 p. (In Russ.).
19. Zhilo N.L. *Formation and Properties of Blast Furnace Slag*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 120 p. (In Russ.).
20. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Kim A.S. Physical properties of boron-containing blast furnace slag. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 1996, no. 3, pp. 27–31. (In Russ.).
21. Liu W., Pang Z., Wang J., Zuo H., Xue Q. Investigation of viscosity and structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ slag melt. *Ceramics International*. 2022, vol. 48, no. 12, pp. 17123–17130. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.268>
22. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. IVTANTHERMO for Windows – database on thermodynamic properties and related software. *Calphad*. 1999, vol. 23, no. 2, pp. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(99)00023-1)
23. Akberdin A.A., Kim A.S. Blast furnace smelting with boron-containing slags. In: *Theory and Practice of Cast Iron Production: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 70th Anniversary of KGMK Krivorozhstal*. Krivoi Rog, 2004, pp. 146–149. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Семенович Вусихис, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО 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 УрО РАН
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Сергей Николаевич Агафонов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: agafonovs@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Sergei N. Agafonov, 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
E-mail: agafonovs@ya.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

А. С. Вусихис – постановка задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.
Л. И. Леонтьев – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование статьи.
С. Н. Агафонов – проведение расчетов, проведение экспериментов.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

A. S. Vusikhis – setting the research problem, performing the calculations, preparing the text, formation of the conclusions.
L. I. Leont'ev – scientific guidance, analysis of the research results, editing the article.
S. N. Agafonov – performing the calculations, conducting the experiments.

Поступила в редакцию 13.07.2022
 После доработки 15.07.2022
 Принята к публикации 16.07.2022

Received 13.07.2022
 Revised 15.07.2022
 Accepted 16.07.2022