



УДК 669.046.582.2

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-495-505



Оригинальная статья

Original article

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОРА МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ В ПРОЦЕССЕ ПЛАВКИ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СИДЕРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА В ЭЛЕКТРОПЕЧИ

А. С. Вусихис¹, С. Н. Тюшняков¹, К. В. Пикулин¹,
С. Н. Агафонов¹, Л. И. Леонтьев^{1, 2, 3}

¹ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (620016, Россия, 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)

✉ AgafonovS@yandex.ru

Аннотация. Металлургические предприятия Урала компенсируют дефицит железорудного сырья поставкой материалов из Центральной России, Кольского полуострова и Казахстана. Карбонатные железные руды (сидериты) Бакальского месторождения относятся к бедным рудам и, несмотря на большие запасы (около 1 млрд т), не пользуются широким спросом у металлургов ввиду низкого качества (низкое содержание железа и высокое – магния). Перспективы освоения Бакальского месторождения зависят от наличия новых технологий переработки сидеритов. Существует технология переработки бедных железных руд методом бескоксовой металлургии, включающая восстановительный обжиг во вращающейся печи, измельчение и магнитную сепарацию с получением высокометаллизированного продукта, пригодного для сталеплавильного производства. Лабораторные исследования и промышленные испытания подтвердили ее пригодность для переработки сидеритов. Предложена модернизированная технология переработки сидеритов, в которой операции измельчения и магнитной сепарации исключены, а продукт восстановительного обжига во вращающейся печи в горячем виде загружается в электропечь для проведения разделительной плавки. Процесс осуществляют в присутствии колеманита, содержащего борный ангидрид, для получения жидкого шлака. В ходе плавки часть бора переходит в металлический расплав. Посредством термодинамического моделирования проведена оценка распределения бора между металлом и шлаком в результате разделительной плавки. Показано, что при содержании в шихте 5 и 10 % колеманита в зависимости от доли углерода в металл переходит до 60 % бора. Такой металл может быть использован в качестве лигатуры для получения борсодержащей стали или чугуна. При барботаже металлического расплава кислородом содержание бора может быть снижено до 0,0001 %.

Ключевые слова: сидериты, металлизация, разделительная плавка, колеманит, бор, распределение

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00363, <https://rscf.ru/project/25-29-00363/>.

Для цитирования: Вусихис А.С., Тюшняков С.Н., Пикулин К.В., Агафонов С.Н., Леонтьев Л.И. Распределение бора между металлом и шлаком в процессе плавки металлized siderite concentrate в электропечи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(5):495–505. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-495-505>

BORON DISTRIBUTION BETWEEN METAL AND SLAG DURING MELTING OF METALIZED SIDERITE CONCENTRATE IN ELECTRIC FURNACE

A. S. Vusikhis¹, S. N. Tyushnyakov¹, K. V. Pikulin¹,
S. N. Agafonov¹✉, L. I. Leont'ev^{1, 2, 3}

¹ Votolin Institute of Metallurgy of the 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 Presidium of the Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

✉ AgafonovS@yandex.ru

Abstract. The Ural metallurgical enterprises compensate for the deficit of iron ore raw materials by supplying materials from Central Russia, the Kola Peninsula and Kazakhstan. Carbonate iron ores (siderites) of the Bakalskoye deposit are poor ores and, despite large reserves (about 1 billion tons), are not in great demand among metallurgists due to their low quality (low iron content and high magnesium content). The prospects for developing the Bakalskoye deposit depend on the availability of new technologies for processing siderites. There is a technology for processing poor iron ores using the coke-free metallurgy method, including reducing roasting in a rotary kiln, grinding and magnetic separation to obtain a highly metallized product suitable for steelmaking. Laboratory studies and industrial tests confirmed its suitability for processing siderites. A modernized technology for processing siderites is proposed, in which the operations of grinding and magnetic separation are excluded, and the product of reducing roasting in a rotary kiln is loaded hot into an electric furnace for separating melting. The process is carried out in the presence of colemanite containing boric anhydride to obtain liquid slag. During melting, part of the boron passes into the metal melt. By means of thermodynamic modeling, an assessment of the distribution of boron between the metal and slag as a result of separating melting is carried out. With a content of 5 and 10 % of colemanite in the charge, depending on the proportion of carbon, up to 60 % of boron passes into the metal. Such metal can be used as a ligature for obtaining boron-containing steel or cast iron. When bubbling the metal melt with oxygen, boron content can be reduced to 0.0001 %.

Keywords: siderites, metallization, separation melting, colemanite, boron, distribution

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-29-00363, <https://rscf.ru/project/25-29-00363/>.

For citation: Vusikhis A.S., Tyushnyakov S.N., Pikulin K.V., Agafonov S.N., Leont'ev L.I. Boron distribution between metal and slag during melting of metalized siderite concentrate in electric furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):495–505.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-495-505>

ВВЕДЕНИЕ

Запасы карбонатных железных (сидеритовых) руд Бакальского месторождения, расположенного вблизи г. Бакал Челябинской области, составляют около 1 млрд т [1; 2]. Однако дефицит железорудного сырья металлургические предприятия Урала покрывают поставками из Центральной России (Михайловский ГОК, Лебединский ГОК), Кольского полуострова (Костомукшский ГОК) и Казахстана (Соколовско-Сарбайский ГОК) [3; 4]. Бакальские сидериты являются бедными железными рудами с содержанием железа менее 35 % и наличием большой доли оксида магния. Низкое качество руды ограничивает спрос на нее, поэтому добыча сидеритов во много раз меньше, чем позволяют горно-геологические условия. Например, в 2006 г. добыча руды составила 1,7 млн т или менее 3 % от добычи по Уральскому федеральному округу [5]. Единственный реализованный метод переработки Бакальских сидеритов – доменная плавка [1; 2]. Существующие методы обогащения [6; 7] позволяют увеличить в получаемом концентрате содержание железа. Однако весь оксид магния

остается в нем, поэтому такой концентрат можно использовать в доменной плавке только в качестве добавки в шихту и в таком количестве, чтобы содержание оксида магния в конечном шлаке не превышало 20 %. В связи с этим перспективы освоения Бакальского месторождения зависят от наличия новых технологий переработки сидеритов.

С целью расширения области использования сидеритов и повышения эффективности их применения разработана технология пирометаллургического обогащения [2; 8; 9], включающая восстановительный обжиг сидеритов во вращающейся печи твердым восстановителем с последующим выделением высокометаллизированного продукта методом магнитной сепарации. Концентрат содержит менее 5 % пустой породы и в виде брикетов может быть использован как сырье для дуговой электропечи.

Для снижения стоимости процесса за счет исключения операций измельчения, магнитной сепарации, сушки и брикетирования предложено вести плавку не на брикетах, а на кусковом металлизированном концентрате, в горячем виде поступающем в электропечь непосредственно из вращающейся печи [10]. Срав-

нительный анализ процессов показал, что затраты электроэнергии на плавку металлized брикетов, загружаемых в печь при 25 °С, составляют 773 кВт·ч/т металла, а кускового металлized концентрата с температурой 1000 °С – 725 кВт·ч/т металла [11].

Известно, что добавка в шлак борного ангидрида снижает температуру его плавления [12; 13]. Поскольку пустая порода металлized концентрата содержит большое количество оксида магния, для получения жидкоподвижного шлака с низкой температурой плавления в шихту добавляют оксид бора в виде обожженного колеманита. Это позволяет иметь шлак с вязкостью при температуре плавки 1600 °С менее 0,4 Па·с и температурой плавления 1300 – 1500 °С в зависимости от доли колеманита в шихте и соотношения SiO_2/MgO в шлаке [14].

При наличии в сталеплавильном шлаке оксида бора возможен его переход в металл в виде бора [15]. В связи с вышесказанным, целью работы является оценка распределения бора между металлом и шлаком в процессе разделительной плавки металлized концентрата из сидеритовой руды в присутствии колеманита методом термодинамического моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Металлургические процессы протекают при высоких температурах и с большой скоростью, поэтому с достаточно высокой вероятностью можно считать, что в процессе плавки сидеритов достигается состояние, близкое к равновесному. В связи с этим для оценки распределения бора между металлом и шлаком использовали метод термодинамического моделирования (ТДМ),

широко используемый для расчета многокомпонентных и многофазных систем при решении теоретических и прикладных задач по совершенствованию металлургических технологий. Моделирование равновесных состояний в системе Fe–Ca–Si–Mg–Al–Mn–C–O вели в программном комплексе ИВТАНТЕРМО. Численные показатели полной энтальпии полученных равновесных составов осуществляли в программном комплексе HSC Chemistry 6.12.

В сидеритовых рудах месторождений Бакальского рудного поля, подвергнутых предварительному гравитационному или рентгенорадиометрическому обогащению [16] с целью удаления сланцев, содержание большинства компонентов незначительно отличается друг от друга. Основное отличие заключается в разности соотношения оксидов кремния и магния [17; 18]. В связи с этим, в качестве исходного материала для исследований взят концентрат следующего состава, мас. %: 33,08 $\text{Fe}_{\text{общ}}$; 38,94 FeO; 2,27 Fe_2O_3 ; 1,41 CaO; 0,66 SiO_2 ; 11,22 MgO; 0,38 Al_2O_3 ; 0,85 Mn, соотношение SiO_2/MgO в котором регулировали добавкой кварца. Конечные составы модельных концентратов приведены в табл. 1.

Массы (m_k) и составы металлized сидеритовых концентратов (МСК) при степени металлизации $\varphi = 95\%$, получаемых из 1 кг исходных концентратов, приведены в табл. 2.

В качестве флюсующей добавки, предназначенной для разжижения шлака, использован прокаленный колеманит [19] состава, мас. %: 8,0 SiO_2 ; 34,0 CaO; 4,0 MgO и 54,0 B_2O_3 . На практике твердый восстановитель (кок-сик) крупностью 3 – 5 мм отделяют от кусков МСК крупностью 10 – 60 мм грохочением. Однако какая-то

Таблица 1. Составы исходных модельных концентратов, используемых ТДМ в составе рабочего тела

Table 1. Compositions of the initial model concentrates used in thermodynamic modeling method as part of the working fluid

Соотношение SiO_2/MgO	Содержание, мас. %								
	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	FeO	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	MnO	п.п.п.
0,75	31,34	38,30	2,23	1,39	8,28	11,04	0,37	1,08	37,31
1,00	30,50	37,28	2,17	1,35	10,74	10,74	0,36	1,05	36,31
1,25	29,70	36,30	2,12	1,31	13,07	10,46	0,35	1,02	35,36

Таблица 2. Массы и составы МСК при степени металлизации 95 %

Table 2. Masses and compositions of MSCs with a metallization degree of 95 %

Соотношение SiO_2/MgO	m_k , кг	Содержание, мас. %							
		$\text{Fe}_{\text{общ}}$	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	MnO
0,75	539,43	58,10	55,19	3,73	2,57	15,35	20,46	0,69	2,00
1,00	551,79	55,27	52,51	3,55	2,45	19,46	19,46	0,66	1,90
1,25	563,51	52,71	50,07	3,39	2,33	23,20	18,56	0,63	1,82

часть восстановителя может поступать в электропечь вместе с ними, поэтому в расчетах принято, что в шихте электропечи содержится углерод.

Таким образом, рабочие тела, в которых производится расчет равновесия фаз, состоят из МСК (табл. 2), колеманита и углерода, взятых в количестве 0, 5 и 10 %, и 0, 2, 4 и 6 % соответственно от массы металлизированного концентрата. Моделирование вели при температуре 1600 °С, давлении 0,1 МПа и условии, что оксидная и металлическая фазы являются идеальными растворами.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты равновесия в системах МСК – углерод показали следующее. При наличии углерода в оксидной фазе происходит уменьшение количества оксидов железа, марганца и кремния (рис. 1) и их переход в металл вместе с остаточным углеродом (рис. 2).

При температуре 1600 °С, соответствующей температуре плавки, металл на основе железа будет находиться в жидком состоянии. Для оценки температур начала кристаллизации полученных в результате расчетов шлаков использованы два метода.

В основе первого метода лежат результаты работы [14], в которой рассмотрено влияние соотношения SiO_2/MgO и доли колеманита в шихте на температуру перехода шлаков из высокотемпературной области их существования в низкотемпературную, близкую к температуре ликвидуса. Зависимость описывается следующим эмпирическим уравнением:

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

где x – соотношение SiO_2/MgO , ед.; y – содержание колеманита, мас. %.

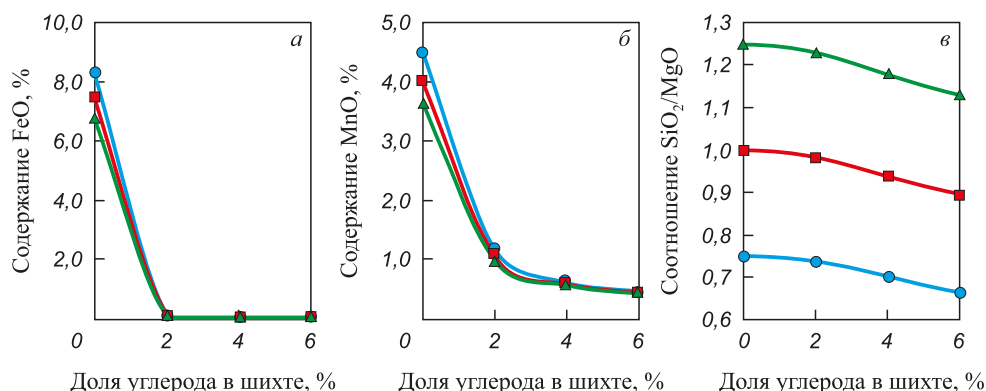


Рис. 1. Зависимость содержания в оксидной фазе FeO (а), MnO (б), соотношения SiO_2/MgO (в) от доли углерода в шихте: ● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 1. Dependence of content of FeO (a), MnO (б), SiO_2/MgO ratio (в) in the oxide phase on carbon proportion in the charge: ● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

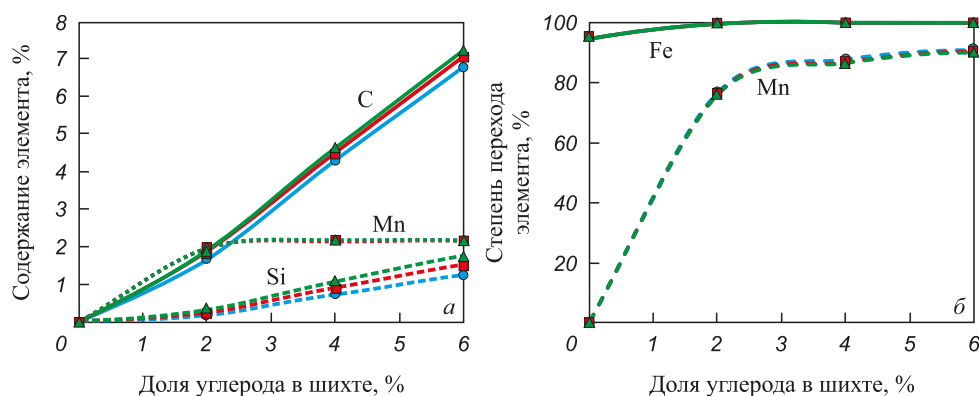


Рис. 2. Зависимость содержания углерода, марганца и кремния в металле (а) и степени металлизации железа и марганца (б) от доли углерода в шихте: ● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 2. Dependence of content of carbon, manganese and silicon in the metal (a) and metallization degree of iron and manganese (б) on carbon proportion in the charge: ● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

Установлено, что при отсутствии колеманита в шихте температура перехода с увеличением соотношения SiO_2/MgO с 0,75 до 1,25 уменьшается с 1640 до 1510 °C.

Аналогичный результат достигнут при расчете вторым методом, описанным в работе [20], согласно которому температуры начала (t_c) и конца плавления (t_l) (солидус и ликвидус) определены по перегибам на кривых полной энтропии и энтальпии, определяющих состояние систем. Данный метод лег в основу расчетов температуры ликвидус для шлаковых систем, рассматриваемых в данной работе.

В качестве исходных выбраны шлаки, составы которых определены в ходе расчета равновесия в системе МСК – углерод. Расчеты показали, что в шлаках при отсутствии углерода и $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 0,75 - 1,25$, t_l находятся в интервале 1450 – 1600 °C (рис. 3). В шлаках, полученных в результате взаимодействия МСК с углеродом, уменьшение доли FeO , как следствие повыше-

ния доли углерода, не приводит к дальнейшему повышению t_l (рис. 4).

Таким образом, расчеты температур начала кристаллизации оксидных фаз, полученных в результате взаимодействия МСК с углеродом, показали, что при 1600 °C, что соответствует температуре в электропечи, они будут находиться в гетерогенном состоянии. Это подтверждает необходимость добавки флюса на основе борного ангидрида для их разжижения, в качестве которого выбран колеманит.

Расчет равновесия в системе МСК – колеманит – углерод показал следующее. Добавка углерода приводит к увеличению доли марганца и кремния в металле и уменьшению содержания оксидов железа, марганца и кремния в шлаковой фазе, как и в системе МСК – углерод (рис. 5 – 8). Дополнительно в металл переходит бор с одновременным уменьшением содержания оксида бора в шлаке.

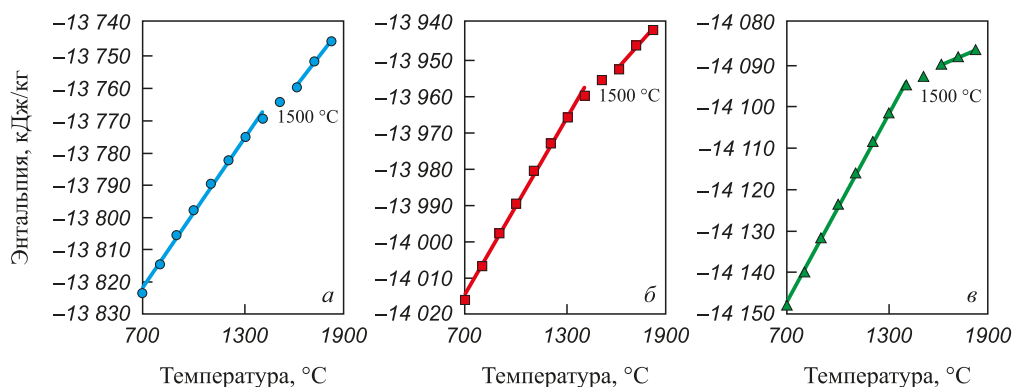


Рис. 3. Зависимость полной энтальпии системы от температуры для шлаковых систем, не содержащих в своем составе колеманит и углерод, при изменении соотношения SiO_2/MgO : а – 0,75; б – 1,00; в – 1,25

Fig. 3. Dependence of the system total enthalpy on temperature for slag systems not containing colemantite and carbon, with a change in SiO_2/MgO ratio: а – 0.75; б – 1.00; в – 1.25

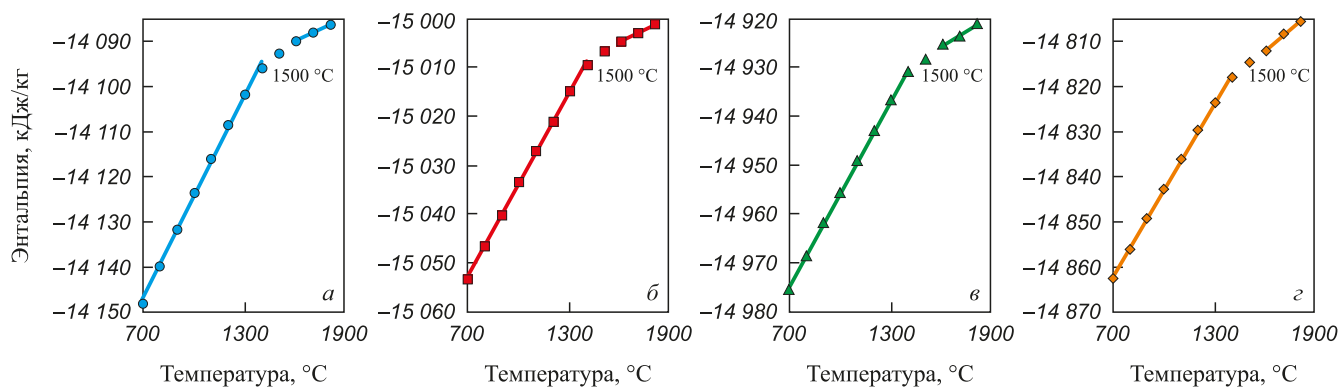


Рис. 4. Зависимость полной энтальпии системы от температуры для шлаковых систем, рассчитанных при соотношении $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 1,25$ и не содержащих в своем составе колеманит, при изменении доли углерода, %: а – 0; б – 2; в – 4; г – 6

Fig. 4. Dependence of the system total enthalpy on temperature for slag systems calculated at $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 1.25$ and not containing colemantite, with a change in carbon proportion, %: а – 0; б – 2; в – 4; г – 6

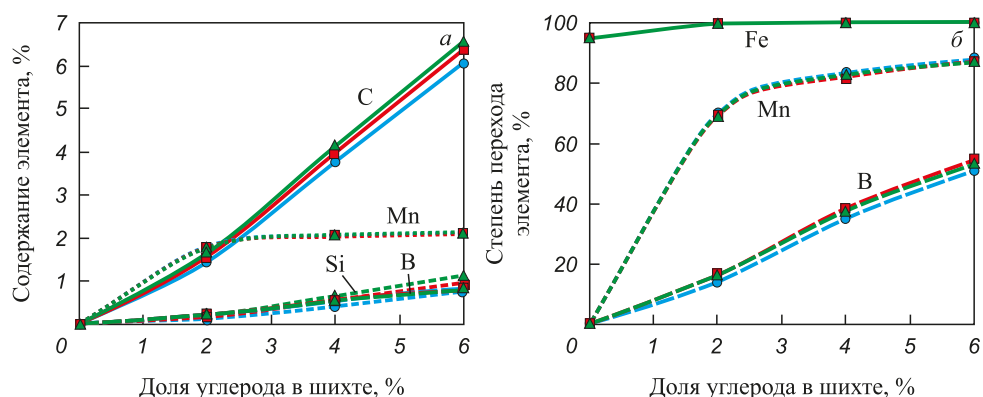


Рис. 5. Зависимость содержания углерода, марганца, бора и кремния в металле (а) и степени металлизации железа, марганца и бора (б) от доли углерода в шихте при добавке к МСК 5 % колеманита:

● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 5. Dependence of content of carbon, manganese, boron and silicon in the metal (a) and metallization degree of iron, manganese and boron (b) on carbon proportion in the charge with addition of 5 % of colemanite to the metallized siderite concentrates (MSC):

● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

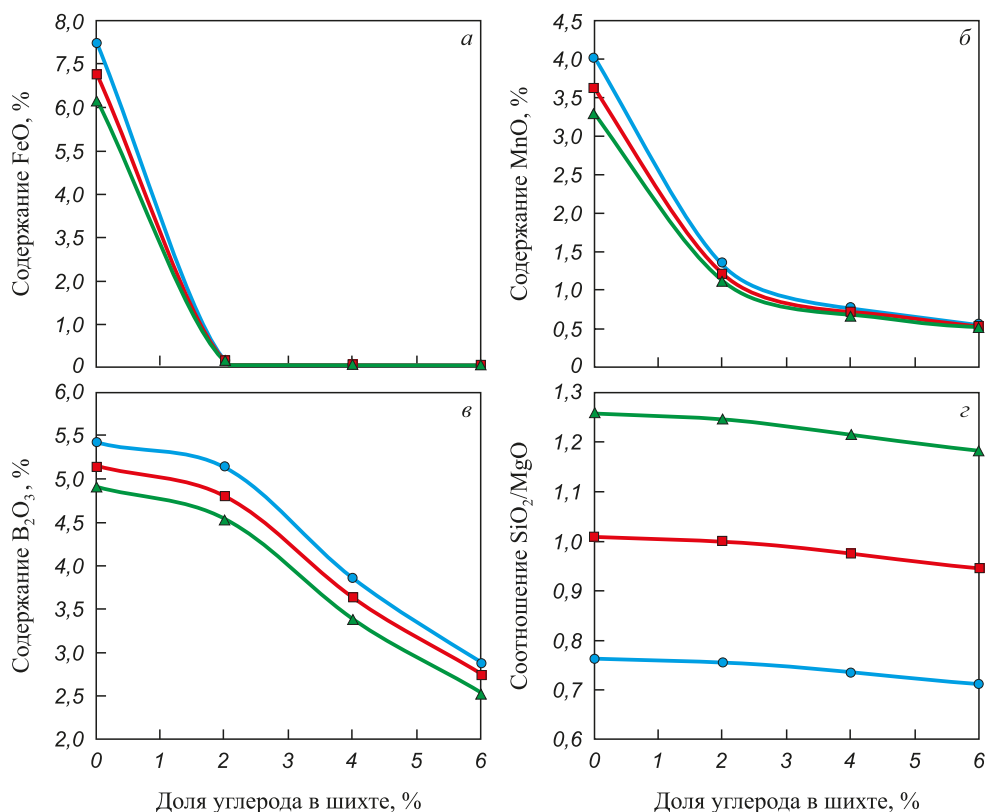


Рис. 6. Зависимость содержания в оксидной фазе FeO (а), MnO (б), B₂O₃ (в) и соотношения SiO₂/MgO (г) от доли углерода в шихте при добавке к МСК 5 % колеманита:

● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 6. Dependence of content in the oxide phase of FeO (a), MnO (б), B₂O₃ (в), and ratio SiO₂/MgO (г) on carbon proportion in the charge with addition of 5 % of colemanite to the metallized siderite concentrates (MSC):

● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

При отсутствии углерода составы оксидных фаз близки к составам шлаков, исследованных в работе [14], в которых при увеличении соотношения SiO₂/MgO с 0,75 до 1,25 $t_{\text{д}}$ уменьшается с 1520 до 1370 °C, а вязкость всех шлаков составляет менее 0,3 Па·с.

Оценка температур фазовых переходов в системах МСК – колеманит – углерод (рис. 9) указывает на снижение температур ликвидус с 1500 до 1400 °C при добавке колеманита в количестве 5 – 10 % от массы шихты. Это позволяет сделать вывод о возможности проведения

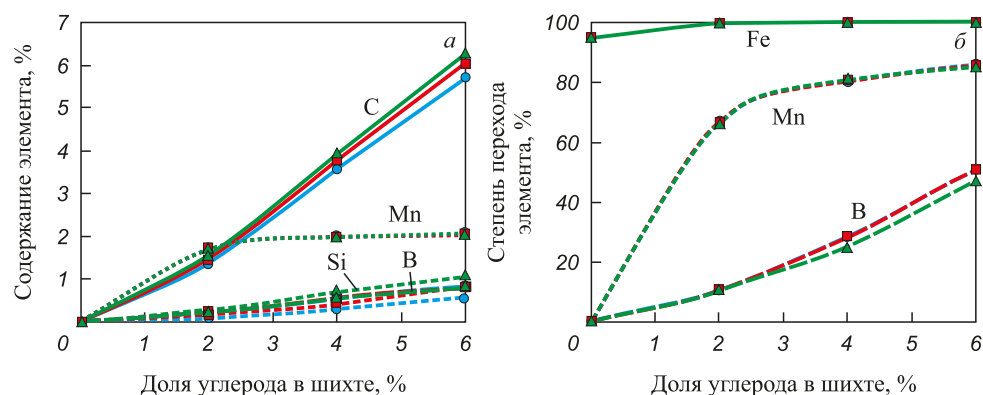


Рис. 7. Зависимость содержания углерода, марганца, бора и кремния в металле (а) и степени металлизации железа, марганца и бора (б) от доли углерода в шихте при добавке к МСК 10 % колеманита:

● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 7. Dependence of content of carbon, manganese, boron and silicon in the metal (a) and metallization degree of iron, manganese and boron (b) on carbon proportion in the charge with addition of 10 % of colemanite to MSC:

● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

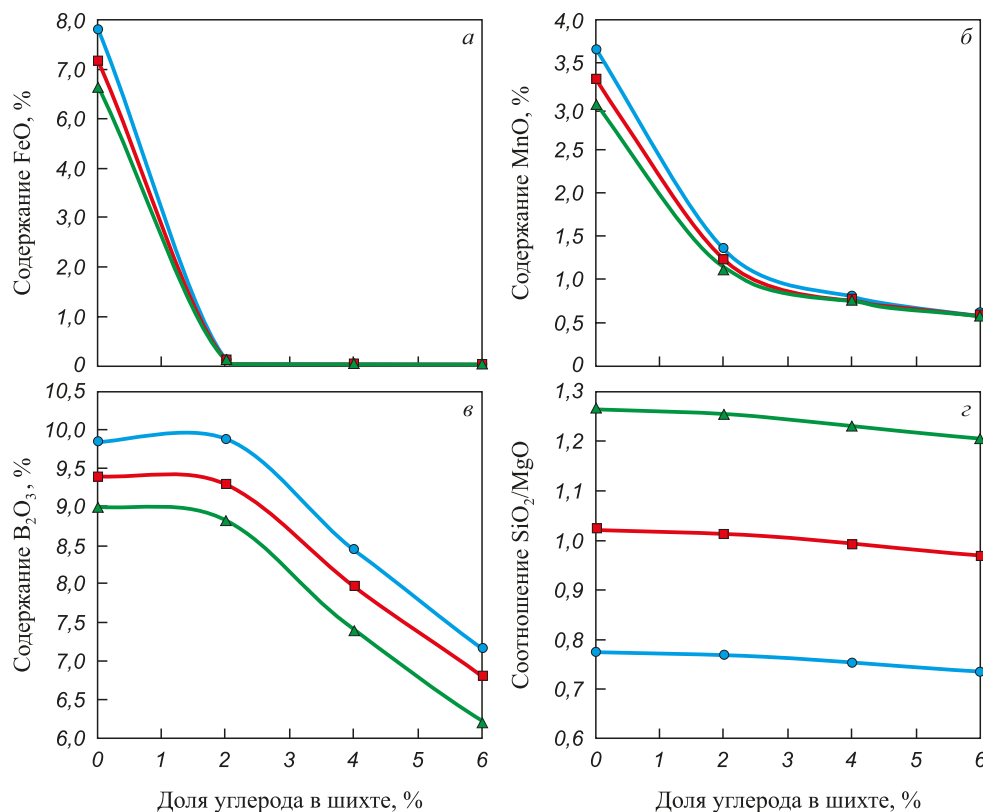


Рис. 8. Зависимость содержания в оксидной фазе FeO (а), MnO (б), B₂O₃ (в) и соотношения SiO₂/MgO (г) от доли углерода в шихте при добавке к МСК 10 % колеманита:

● – 0,75; ■ – 1,00; ▲ – 1,25

Fig. 8. Dependence of content in the oxide phase of FeO (a), MnO (б), B₂O₃ (в) and the ratio SiO₂/MgO (г) on carbon proportion in the charge with addition of 10 % of colemanite to MSC:

● – 0.75; ■ – 1.00; ▲ – 1.25

плавки МСК со степенью металлизации 95 % в присутствии колеманита даже при наличии в шихте углерода. Согласно теоретическим расчетам, шлак в этом случае будет обладать достаточно низкой температурой плавления, что позволит после разделительной плавки от

металла при 1600 °С извлекать его из печи. Следует отметить, что в зависимости от содержания в шихте углерода металл будет содержать марганец, кремний и бор.

Небольшие добавки бора улучшают качество чугуна [21; 22], стали [23 – 25] и наплавочных материа-

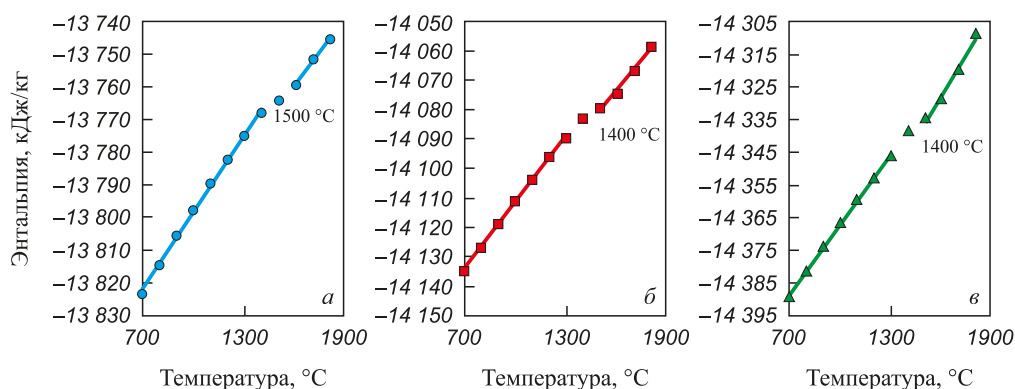


Рис. 9. Зависимость полной энтальпии системы от температуры для шлаковых систем, рассчитанных при соотношении $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 0,75$ и не содержащих в своем составе углерод, при изменении соотношения колеманита, %:

a – 0; *b* – 5; *v* – 10

Fig. 9. Dependence of the system total enthalpy on temperature for slag systems calculated at $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 0.75$ and not containing colemanite, with a change in carbon proportion, %:

a – 0; *b* – 5; *v* – 10

лов [26]. Они вызывают значительное измельчение зерен. В результате упрочнения границ зерен боридами происходит повышение жаропрочности, возрастают твердость и износостойкость. Резко повышается прокаливаемость стали по сравнению с аналогичной сталью без бора. Микродобавки бора (в чугунах около 0,01 %, а в сталях – не более 0,001 – 0,003 %) позволяют заменить такие легирующие элементы, как никель, хром, молибден и марганец в количестве, в 300 – 400 раз превышающих расход бора, сохраняя при этом качество металла.

В предложенной технологии в металл переходит значительно большее количество бора, чем это необходимо для получения качественного чугуна или стали. В связи с этим полученный металл можно использовать в качестве лигатуры, либо в нем надо значительно уменьшить содержание бора, например, барботажным окислением кислородом.

Для оценки возможности проведения барботажного окисления дополнительно выполнено его термодинамическое моделирование с помощью методики, примененной ранее для моделирования барботажного восстановления металлов из оксидных расплавов [27 – 29]. В качестве исходного рабочего тела использовался металл следующего состава, %: 96,1 Fe; 1,7 C; 0,20 Si; 1,80 Mn и 0,26 B (1 кг). Газовой фазой являлся кислород, взятый в количестве 7,3 дм³/кг металла. Моделирование вели при температуре 1600 °C и давлении 1 атм при условии, что расплав являлся идеальным раствором.

Расчеты осуществлены в следующей последовательности:

- ввод исходных данных по количеству металлического расплава и кислорода;
- расчет равновесного состояния системы методами ТДМ;
- фиксация равновесных составов и количества компонентов в оксидном и металлическом расплавах, а также газе;

– проведение следующего цикла, когда за исходный принимается состав металлического расплава, полученный в ходе предыдущего расчета, при этом шлак считается выведенным из системы и не учитывается, а вводимая порция газа по составу и количеству не меняется;

– циклы повторяют до тех пор, пока количество окисляемых компонентов в расплаве не уменьшится до заданной величины.

На рис. 10 представлена зависимость изменения содержания компонентов в металле от расхода кислорода.

В результате барботажного окисления металла доля железа в нем возрастает до 99,86 %, доля марганца уменьшается до 0,13 %, кремний окисляется полностью, а бор – до 0,000002 %. При этом из 1 кг исходного металла образуется 940 г конечного металла и 201 г шлака состава, мас. %: 46,7 FeO; 6,7 SiO₂; 34,3 MnO; 12,4 B₂O₃, который можно использовать совместно с колеманитом в качестве дополнительного источника бора.

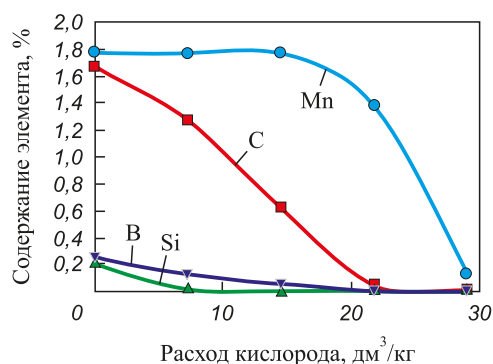


Рис. 10. Зависимость содержания компонентов в металле от расхода кислорода

Fig. 10. Dependence of the components content in the metal on oxygen consumption

Выводы

Термодинамическое моделирование процесса разделительной плавки металлized siderite концентрата совместно с колеманитом в присутствии углерода позволило описать распределение бора между металлом и шлаком в зависимости от доли колеманита и углерода в системе. Показано, что добавки колеманита в количестве 5 – 10 % от массы шихты снижают температуру плавления шлака до 1400 °С, что позволит эффективно извлечь металл и шлак из печи при температуре 1600 °С. При увеличении содержания углерода в шихте до 6 % отмечена линейная зависимость степени перехода бора в металл до 60 %. Борсодержащий металл предложено использовать в качестве лигатуры для микролегирования чугунов и сталей или для получения металла-полупродукта, пригодного для внепечной обработки, предварительно барботированного кислородом. Получающийся в результате барботажа шлак можно использовать в качестве дополнительного борсодержащего компонента шихты. Результаты расчетов будут полезны для организации проведения экспериментальных исследований процессов разделительной плавки металлized siderite концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Красноборов В.А., Ярошевский С.Л., Денисов А.А., Рудин В.С., Бирючев В.И., Полушкин М.Ф. Эффективность и перспективы применения сидеритовых руд в доменной плавке. Донецк: Новый мир; 1996:74.
2. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Спирин Н.А., Шацилло В.В. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам: Монография. Екатеринбург: ООО АМК «День РА»; 2016:428.
3. Волков Ю.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Стратегия освоения сырьевых ресурсов Урала. *Горная промышленность*. 2006;(4):57–62.
Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Strategy for development of raw material resources of the Urals. *Gornaya promyshlennost'*. 2006;(4):57–62. (In Russ.).
4. Волков Ю.В., Славиковский О.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Перспективы развития сырьевой базы горно-металлургических предприятий Урала. *ГИАБ*. 2007;(5):286–290.
Volkov Yu.V., Slavikovskii O.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Prospects for development of raw material base of mining and metallurgical enterprises of the Urals. *GIAB*. 2007;(5):286–290. (In Russ.).
5. Пахомов В.П., Душин А.В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УРФО. *Экология региона*. 2008;(3):129–143.
Pakhomov V.P., Dushin A.V. Assessment of mineral resource security of the Urals Federal District. *Ehkologiya regiona*. 2008;(3):129–143. (In Russ.).
6. Жунев А.Г., Федоренко Н.В., Червоткин В.В. Окислительный обжиг сидеритовых руд в шахтных печах. В сб.: *Окускование железных руд и концентратов. Труды института «Уралмеханобр»*. 1976;(3):28–38.
7. Бланк М.Э., Червоткин В.В., Кончаковский В.Р. Разработка и исследование двухстадийного способа металлзации железорудного сырья в трехзонной шахтной печи. В сб.: *Теория и практика прямого получения железа*. Москва: Наука; 1986:207–211.
8. Меламуд С.Г., Шацилло В.В., Дудчук И.А., Мушке-тов А.А., Братыгин Е.В., Юрьев Б.П. Разработка технологии обогащения металлized siderite руды с получением концентрата для выплавки электростали. *Сталь*. 2011;(6):4–9.
Melamud S.G., Shatsillo V.V., Dudchuk I.A., Mushketov A.A., Bratygin E.V., Yur'ev B.P. Enrichment of reduced siderite ore to produce concentrate for electrosteel smelting. *Steel in Translation*. 2011;41(6):492–498.
<https://doi.org/10.3103/S0967091211060076>
9. Вусихис А.С., Шешуков О.Ю., Леонтьев Л.И. Способ металлзации магнийсодержащих карбонатных железорудных материалов. Патент РФ 2489494. Бюл. 2013;(22).
10. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. Способ переработки магнийсодержащих карбонатных железорудных материалов. Патент РФ 2820696. Бюл. 2024;(16).
11. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Чесноков Ю.А. Оценка эффективности электроплавки металлized siderite концентрата. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(6):653–658.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-653-658>
- Vusikhis A.S., Leon'yev L.I., Chesnokov Yu.A. Evaluating the efficiency of metallized siderite concentrate electric melting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):653–658.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-653-658>
12. Hongming W., Tingwing Z., Hua Z., Li G., Yan Y., Wang J. Effect of B₂O₃ on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux. *ISIJ International*. 2011;51(5):702–708.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.702>
13. Ren Sh., Zhang J., Wu L., Liu W., Bai Y., Xing X., Su B., Kong D. Influence of B₂O₃ on viscosity of high Ti-bearing blast furnace slag. *ISIJ International*. 2012;52(6):984–991.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.984>
14. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Михеенков М.А. Влияние борного ангидрида на вязкость шлаков электроплавки металлized siderite концентрата. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(5):612–618.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-597-603>
- 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>
15. Zhuchkov V.I., Salina V.A., Sychev A.V. The study of the process of metal-thermal reduction of boron from the slag of the system CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–B₂O₃. *Materials Science Forum*. 2019;946:423–429.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.423>
16. Загайнов С.А., Юрьев Б.П. Обогащительные процессы и устройства для их реализации. Екатеринбург: УрФУ; 2012:110.
17. Тимесков В.А. Минералогия карбонатных руд и вмещающих их карбонатных пород Бакальского железорудного месторождения на Южном Урале. Казань: Казанский университет; 1963:214.

18. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2022:116.
19. Öztürk Ç., Akpınar S., Tığ M. Effect of calcined colemanite addition on properties of porcelain tile. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2022;58:321–331. <https://doi.org/10.1007/s41779-021-00674-2>
20. Маршук Л.А., Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. Исследование физико-химических характеристик оксидных систем $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ методом термодинамического моделирования. Труды VI Конгресса с международным участием «Техноген-2023», 11–14 июля 2023. Екатеринбург; 2023:361–363.
21. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Влияние бора и температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на структурно-фазовое состояние жароизносостойких белых чугунов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(11):887–893. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-887-893>
Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of boron modification and cooling conditions during solidification on structural and phase state of heat- and wear-resistant white cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(11):887–893. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-887-893>
22. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватулин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых indefinitных прокатных валков. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016;14(3):78–89.
Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatulín I.Kh. Influence of chemical composition on the properties of the working layer of centrifugally cast indefinite rolling rolls. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2016;14(3):78–89. (In Russ.).
23. Кель И.Н., Жучков В.И., Сычев А.В. Применение борсодержащих материалов в черной металлургии. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018;(5):48–53.
Kel' I.N., Zhuchkov V.I., Sychev A.V. Application of boron-containing materials in ferrous metallurgy. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018;(5):48–53. (In Russ.).
24. Назюта Л.Ю., Цуркан М.Л., Тихонюк Л.С., Тарасенко О.С., Хавалиц Ю.В. Влияние бора на технологические свойства среднеуглеродистых конструкционных сталей рядового сортамента. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2018;(37):22–28.
Nazyuta L.Yu., Tsurkan M.L., Tikhonyuk L.S., Tarasenko O.S., Khavalits Yu.V. Influence of boron on technological properties of medium-carbon structural steels of ordinary assortment. *Visn. priazov. state. technical. un-tu*. 2018;(37):22–28. (In Russ.).
25. Барадынцева Е.П., Глазунова Н.А., Роговцова О.В. Влияние микролегирования бором на прокаливаемость сталей. *Литье и металлургия*. 2016;(3(84)):70–74.
Baradyntseva E.P., Glazunova N.A., Rogovtsova O.V. Effect of boron microalloying on hardenability of steels. *Lit'e i metallurgiya*. 2016;(3(84)):70–74. (In Russ.).
26. Лямин А.В., Мадрахимов Д.У. Влияние наличия бора на фазовое состояние и на свойства наплавочных материалов. *Молодой ученый*. 2021;(4(346)):24–26.
Lyamin A.V., Madrakhimov D.U. Influence of boron on phase state and properties of surfacing materials. *Molodoi uchenyi*. 2021;(4(346)):24–26. (In Russ.).
27. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н., Ченцов В.П. Моделирование процесса газового восстановления металлов из многокомпонентного оксидного расплава в барботируемом слое. *Бутлеровские сообщения*. 2018;55(7):58–63.
Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N., Chentsov V.P. Modeling the process of gas reduction of metals from a multicomponent oxide melt in bubbling layer. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2018;55(7):58–63. (In Russ.).
28. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer. In: *The Third Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004)*, Ariel, Israel. 2004;1:72–77.
29. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer. In: *Proceeding of the European Metallurgical Conference (EMC-2005)*. Dresden, Germany. 2005;3:1349–1358.

Сведения об авторах

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

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Станислав Николаевич Тюшняков, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-0864-0462

E-mail: tyushnyakov.sn@gmail.com

Кирилл Владимирович Пикунин, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории редких тугоплавких металлов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-5843-0041

E-mail: pikulin.imet@gmail.com

Information about the Authors

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

ORCID: 0000-0002-6395-0834

E-mail: vas58@mail.ru

Stanislav N. Tyushnyakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-0864-0462

E-mail: tyushnyakov.sn@gmail.com

Kirill V. Pikulin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Rare Refractory Metals, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-5843-0041

E-mail: pikulin.imet@gmail.com

Сергей Николаевич Агафонов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории редких тугоплавких металлов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-6731-3595

E-mail: agafonovs@ya.ru

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

ORCID: 0000-0002-4343-914X

E-mail: leo@presidium.ras.ru

Sergei N. Agafonov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Rare Refractory Metals, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6731-3595

E-mail: agafonovs@ya.ru

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

ORCID: 0000-0002-4343-914X

E-mail: leo@presidium.ras.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

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

С. Н. Тюшняков – проведение расчетов, анализ результатов исследований.

К. В. Пикулин – проведение расчетов, анализ результатов исследований.

С. Н. Агафонов – проведение расчетов, проведение экспериментов.

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

A. S. Vusikhis – setting the research task, performing calculations, writing the text, formation of conclusions.

S. N. Tyushnyakov – performing calculations, analysis of results.

K. V. Pikulin – performing calculations, analysis of results.

S. N. Agafonov – performing calculations, conducting experiments.

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

Поступила в редакцию 11.06.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к публикации 25.06.2025

Received 11.06.2025

Revised 16.06.2025

Accepted 25.06.2025