



УДК 669.162.275.2

DOI 10.17073/0368-0797-2025-3-287-296



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ОКСИДА БОРА НА ВЯЗКОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ CaO – SiO₂ – Al₂O₃ – MgO

А. С. Вусихис¹, М. А. Михеенков¹, Л. И. Леонтьев^{1,2,3},
С. Н. Агафонов¹ 

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. Доля местного железорудного сырья металлургических предприятий Уральского региона составляет 50–60 %. Остальное завозится из Центральной России, Кольского полуострова и Казахстана. Вопрос замены привозного сырья на местное, более дешевое, является весьма актуальным. Добыча сидеритовой железной руды Бакальского месторождения (Южный Урал), запасы которой составляют около 1 млрд т, во много раз меньше, чем это позволяют горно-геологические условия, что связано с незначительным спросом на это сырье из-за низкого качества. Высокое содержание в руде оксида магния делает затруднительным или невозможным ведение доменной плавки с использованием более 20 % сидеритов в шихте. Основой любого доменного шлака является четырехкомпонентная система CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO состава, мас. %: 30–40 SiO₂, 31–49 CaO, 3–18 MgO, 7–20 Al₂O₃. Температура плавления таких шлаков составляет 1280–1320 °С. При температуре 1450 °С их вязкость имеет значение ~0,5 Па·с. Увеличение содержания оксида магния (>20 %) приводит к резкому повышению температуры плавления шлаков, сокращает интервал кристаллизации и делает их нестабильными. В связи с этим материалы, изготовленные из сидеритовой руды с использованием различных технологий подготовки их к доменной плавке (сырая руда, обжиг-магнитное обогащение, агломерация), вводят в шихту только в качестве добавок. Их доля не превышает 20 %. С использованием современных методов статистической обработки экспериментальных данных изучено влияние борного ангидрида на вязкость высокомагнезиальных доменных шлаков, содержащих 15–36 % MgO. Показано, что добавление борного ангидрида в исходную шихту позволяет снизить температуру плавления шлака и увеличить интервал кристаллизации. Это дает возможность вести доменную плавку на шлаках, содержащих около 40 % MgO, что соответствует доле сидерита 40–50 % в исходной шихте.

Ключевые слова: доменный шлак, вязкость, температура плавления, сидеритовая руда, оксид магния, оксид бора, моделирование, доменная плавка

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 25-29-00363 с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

Для цитирования: Вусихис А.С., Михеенков М.А., Леонтьев Л.И., Агафонов С.Н. Влияние добавок оксида бора на вязкость и температуру плавления системы CaO – SiO₂ – Al₂O₃ – MgO. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):287–296.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-287-296>

EFFECT OF BORON OXIDE ADDITIVES ON VISCOSITY AND MELTING POINT OF THE $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ SYSTEM

A. S. Vusikhis¹, M. A. Mikheenkov¹, L. I. Leont'ev^{1,2,3},

S. N. Agafonov¹ 

¹ Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsen 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)

 AgafonovS@yandex.ru

Abstract. The share of local iron ore raw materials of metallurgical enterprises of the Ural region is 50–60 %. The rest is brought from Central Russia, the Kola Peninsula and Kazakhstan. The issue of replacing imported raw materials with local, cheaper ones, is very relevant. The extraction of siderite iron ore of the Bakalskoye deposit (Southern Urals), the reserves of which are about 1 billion tons, is many times less than the mining and geological conditions allow because of the insignificant demand for this raw material due to its low quality. The high content of magnesium oxide in the ore makes blast furnace smelting difficult or impossible using more than 20 % of siderites in the charge. The basis of any blast furnace slag is a four-component system $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ with the following composition, wt. %: 30–40 SiO_2 , 31–49 CaO , 3–18 MgO , 7–20 Al_2O_3 . The melting point of such slags is 1280–1320 °C. At a temperature of 1450 °C, their viscosity is about 0.5 Pa·s. An increase in the magnesium oxide content (>20 %) leads to a sharp increase in melting point of the slags, reduces the crystallization interval and makes them unstable. In this regard, the materials made from siderite ore using various technologies for preparing them for blast furnace smelting (raw ore, roasting-magnetic separation, agglomeration) are introduced into the blast furnace charge only as additives. Their share does not exceed 20 %. The effect of boric anhydride on the viscosity of high-magnesia blast furnace slags containing 15–36 % MgO was studied using modern methods of statistical processing of experimental data. It was shown that addition of boric anhydride to the initial charge allows to reduce the melting point of the slag and to increase the crystallization interval. This makes it possible to conduct blast furnace smelting on slags containing about 40 % MgO , which corresponds to a siderite share of 40–50 % in the initial charge.

Keywords: blast furnace slag, viscosity, melting point, siderite ore, magnesium oxide, boron oxide, modeling, blast furnace smelting

Acknowledgements: The work was performed with the support of the Russian Science Foundation under project No. 25-29-00363 using the equipment of the Ural-M Common Use Center.

For citation: Vusikhis A.S., Mikheenkov M.A., Leont'ev L.I., Agafonov S.N. Effect of boron oxide additives on viscosity and melting point of the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(3):287–296. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-287-296>

ВВЕДЕНИЕ

Шлак, образующийся в процессе доменной плавки, для обеспечения ее успешного хода должен обладать устойчивыми физико-химическими свойствами, слабо изменяющимися при колебаниях химического состава и температуры.

Вязкость шлакового расплава является одним из важнейших физико-химических свойств, определяющих стабильность работы и производительность доменной печи. Конечный доменный шлак должен обладать хорошей текучестью при выпуске из печи. При температурах, соответствующих температуре выпуска передельного чугуна (от 1450 до 1550 °C), его вязкость должна составлять около 0,5 Па·с [1; 2].

В шлаках переход от твердого состояния к жидкому происходит в определенном интервале температур, поэтому температура плавления ($T_{\text{пл}}$) – величина условная. Теоретической мерой температуры плавления является температура ликвидуса ($T_{\text{л}}$) – температура полного исчезновения твердой фазы при нагреве. Практической

мерой этой температуры выступает температура, при которой шлак начинает свободно вытекать из коксовой насадки, что возможно, когда его вязкость становится менее 2,5 Па·с. Обычно она ниже температуры на выпуске на 200–300 °C и составляет 1250–1350 °C [3].

Большое влияние на вязкость шлака оказывает его химический состав, который определяется химическим и минералогическим составами пустой породы железных руд, флюсов и золы кокса, зависит от характера процесса доменной плавки и теплового состояния печи, а также от сорта выплавляемого чугуна. Содержание основных компонентов конечных шлаков при выплавке чугунов на большей части предприятий России, Украины, Европы и Америки составляет, мас. %: 30–40 SiO_2 , 31–49 CaO , 3–18 MgO , 7–20 Al_2O_3 , в незначительных количествах присутствуют MnO (0,1–3,0 %), FeO (0,2–0,8 %), S (0,8–2,2 %) [4; 5]. Без учета примесных оксидов (MnO , FeO , S) можно с высокой степенью достоверности принять, что в основе любого доменного шлака лежит четырехкомпонентная система $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$.

Взаимосвязь с основными компонентами шлака (CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO) зависимости его вязкости от температуры рассмотрена в исследованиях, результаты которых представлены в большом количестве работ.

В таких расплавах, содержащих менее 15 % глинозема, увеличение основности (R) от 0,6 до 1,5, а доли оксида магния от 0 до 20 % приводит к росту температуры плавления до 1350–1400 °С и уменьшению интервала температур загустевания. Шлаки становятся более короткими. При температурах ниже 1400 °С шлаки, содержащие более 25 % MgO, не текучи [6–9].

Изменение доли MgO с 0 до 25 % в шлаке с основностью в интервале 0,6–1,5 приводит к уменьшению вязкости до определенного минимума, область составов которого зависит от содержания глинозема и температуры, причем в кислых шлаках вязкость снижается интенсивнее, чем в основных [10].

В шлаках, содержащих 5 % оксида алюминия, минимальная вязкость, соответствующая температуре 1500 °С, составляет 0,15 Па·с в области составов $R \sim 0,9–1,1$, 17–20 % MgO, 36–38 % SiO₂. Снижение температуры до 1400 °С приводит к увеличению минимальной вязкости до 0,35 Па·с и расширению области ее достижения по содержанию MgO до 13–20 %, сдвигая в сторону более кислых шлаков с 39–41 % SiO₂.

Увеличение содержания глинозема до 10 % повышает минимальную вязкость. С уменьшением температуры с 1500 до 1400 °С она увеличивается с 0,2 до 0,3 Па·с, а область составов ее достижения уменьшается с $R \sim 0,8–1,2$, 13–24 % MgO, 35–40 % SiO₂ (1500 °С) до $R \sim 1,05–1,2$, 14–16 % MgO, 39–41 % SiO₂ (1400 °С) соответственно.

При 15 % Al₂O₃ происходит дальнейшее увеличение минимальной вязкости с 0,30 до 0,55 Па·с и уменьшение соответствующей ей области составов с $R \sim 0,9–1,2$, 15–26 % MgO, 30–33 % SiO₂ до $R \sim 0,8–1,05$, 18–22 % MgO, 33–35 % SiO₂ при снижении температуры от 1500 до 1400 °С. С ростом содержания MgO особенно резко снижается вязкость кислых шлаков, содержащих 25–35 % CaO. В таких шлаках с $R \sim 0,5–0,8$, содержащих 13–18 % Al₂O₃ и 16–25 % MgO, шлаки достаточно подвижны при 1350–1400 °С.

В шлаках, содержащих 20 % Al₂O₃, в интервале $R \sim 1,2–1,5$ температура плавления выше 1500 °С при любых содержаниях MgO. Если $R \sim 1,1–1,2$, кристаллизация происходит при >16 % MgO, с уменьшением R до 0,6 критическое содержание MgO увеличивается до 20 %. Если отношение MgO/Al₂O₃ $\sim 0,5$, то при $R \sim 1,1–1,2$ $T_{\text{д}}$ близко к 1450 °С, уменьшение R до 0,6 снижает $T_{\text{д}}$ до 1350 °С. В таких шлаках минимальная вязкость $T_{\text{д}}$ меняется от 0,4 Па·с (1500 °С) до 1,0 Па·с (1400 °С) при содержании SiO₂ 34–36 % [11–13].

Анализ приведенных данных показывает, что в шлаках с основностью менее 1,0 содержание MgO может достигать 15–20 %, не вызывая больших затруднений

в плавке, поскольку шлаки достаточно текучи и плавятся при температуре ниже 1350 °С. Согласно расчетам [14], такие шлаки образуются из шихты доменной плавки, содержащей порядка 20–30 % сидеритов, в составе которых имеется 10–15 % MgO. Дальнейшее увеличение содержания оксида магния приводит к резкому росту температуры плавления шлаков, делает их короткими и неустойчивыми. Плавка на такой шихте затруднительна или невозможна.

Доля оксида магния в пустой породе сидеритов составляет около 50 % [15–17]. В связи с этим в доменной плавке их используют в виде добавок как непосредственно в исходную шихту, так и при производстве агломерата. Ведение процесса на моношихте из бакальских сидеритов невозможно, поскольку образующиеся шлаки будут обладать очень высокой температурой плавления. В то же время известно [18–21], что добавка в доменные шлаки оксида бора снижает их вязкость во всем диапазоне температур и делает их более длинными.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью балансовой логико-статистической модели, допуская возможность проведения доменной плавки при увеличении содержания оксида магния в шлаке от 15 до 30 % за счет добавок 50 % концентрата обжиг-магнитного обогащения (ОК), оценили влияние добавок 1–3 % В₂O₃ на ее показатели [14].

Согласно расчетам, показатели плавки меняются незначительно, в пределах 3 %. Производительность снижается, а расход кокса и общий расход руды увеличиваются. Добавление В₂O₃ приводит к уменьшению содержания в шлаке всех оксидных составляющих, в том числе MgO, и появлению В₂O₃.

Для оценки влияния добавок оксида бора на вязкость и температуру плавления системы CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO был использован симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента, который способен дать картину процесса, максимально приближенную к реальной, так как учитывает одновременное влияние всех меняющихся факторов.

По диаграммам состав–свойства, которые являются геометрическим изображением многокомпонентной равновесной системы, состоящим из концентрационного элемента диаграммы, описывающего химический состав системы, и геометрического комплекса свойств (поверхность отклика), представляющего собой совокупность точек, линий, либо поверхностей, располагающегося над ним, можно получить информацию о количественных значениях какого-либо свойства, соответствующего определенному составу многокомпонентных систем.

Однако для построения таких диаграмм необходимо проведение большого числа опытов, выявляющих зависимость изучаемых свойств от химического состава многокомпонентной системы.

Трудоемкость экспериментальных исследований требует оптимизации количества опытов. Для этого проводится планирование эксперимента путем построения математической модели объекта, позволяющей анализировать влияние различных составляющих на исследуемое свойство, т. е. получить достаточно полную информацию при минимально возможных затратах. Это дает возможность существенно сократить число экспериментов и получить требуемые результаты с достаточной степенью достоверности. К таким методам относится, в частности, метод симплексных решеток, позволяющий выразить аналитически зависимости свойств от состава в виде непрерывной функции [22].

При симплекс-решетчатом методе планирования эксперимента предполагается, что свойства любой смеси компонентов зависят только от их соотношения, а не от общего количества смеси. Примером таких свойств являются плотность, поверхностные свойства, вязкость, удельная электропроводность гомогенных металлических и шлаковых расплавов, растворимость

газов в смеси растворителей, а также водородный показатель смеси водных растворов при условии неизменности их фазового состава.

Подготовка матрицы планирования эксперимента предназначена для изучения методов планирования, проведения и статистической обработки результатов экспериментов.

При построении матрицы эксперимента исходили из допущения возможности аппроксимации искомой зависимости в виде полиномиальной модели третьей степени с начальными условиями:

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = R = 0,9 \div 1,2; \text{MgO} = 15 - 36 \%; \\ \text{B}_2\text{O}_3 = 0 - 15 \%; \text{Al}_2\text{O}_3 = 5 - 20 \%.$$

При определении начальных условий основывались на том, что, согласно расчетам, при изменении доли сидеритов в шихте от 0 до 50 % содержания SiO_2 и MgO увеличиваются от 35 до 38 % и от 9 до 36 %, а CaO

Таблица 1. Матрица эксперимента

Table 1. Experiment matrix

Номер смеси	Состав смеси				Индекс шлака	Состав смеси				Состав шлака				
	X1	X2	X3	X4		R	MgO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
1	1	0	0	0	Y1	1,2	15	0	5	43,6	36,4	15,0	0	5,0
2	0	1	0	0	Y2	0,9	36	0	5	27,9	31,1	36,0	0	5,0
3	0	0	1	0	Y3	0,9	15	15	5	30,8	34,2	15,0	15,0	5,0
4	0	0	0	1	Y4	0,9	15	0	20	30,8	34,2	15,0	0	20,0
5	0,333	0,667	0	0	Y122	1,0	29	0	5	33,0	33,0	29,0	0	5,0
6	0,333	0	0,667	0	Y133	1,0	15	10	5	35,0	35,0	15,0	10,0	5,0
7	0,333	0	0	0,667	Y144	1,0	15	0	15	35,0	35,0	15,0	0	15,0
8	0	0,333	0,667	0	Y233	0,9	22	10	5	29,8	33,2	22,0	10,0	5,0
9	0	0,333	0	0,667	Y244	0,9	22	0	15	29,8	33,2	22,0	0	15,0
10	0	0	0,333	0,667	Y344	0,9	15	5	15	30,8	34,2	15,0	5,0	15,0
11	0,667	0,333	0	0	Y112	1,1	22	0	5	38,2	34,8	22,0	0	5,0
12	0,667	0	0,333	0	Y113	1,1	15	5	5	39,3	35,7	15,0	5,0	5,0
13	0,667	0	0	0,333	Y114	1,1	15	0	10	39,3	35,7	15,0	0	10,0
14	0	0,667	0,333	0	Y223	0,9	29	5	5	28,9	32,1	29,0	5,0	5,0
15	0	0,667	0	0,333	Y224	0,9	29	0	10	28,9	32,1	29,0	0	10,0
16	0	0	0,667	0,333	Y334	0,9	15	10	10	30,8	34,2	15,0	10,0	10,0
17	0,333	0,333	0,333	0	Y123	1,0	22	5	5	34,0	34,0	22,0	5,0	5,0
18	0,333	0,333	0	0,333	Y124	1,0	22	0	10	34,0	34,0	22,0	0	10,0
19	0,333	0	0,333	0,333	Y134	1,0	15	5	10	35,0	35,0	15,0	5,0	10,0
20	0	0,333	0,333	0,333	Y234	0,9	22	5	10	29,8	33,2	22,0	5,0	10,0
21	0,625	0,125	0,125	0,125	Y1112	1,0875	17,625	1,875	6,875	38,4	35,3	17,6	1,9	6,9
22	0,125	0,625	0,125	0,125	Y2221	0,9375	28,125	1,875	6,875	30,5	32,6	28,1	1,9	6,9
23	0,125	0,125	0,625	0,125	Y3331	0,9375	17,625	9,375	6,875	32,0	34,1	17,6	9,4	6,9
24	0,125	0,125	0,125	0,625	Y4441	0,9375	17,625	1,875	14,375	32,0	34,1	17,6	1,9	14,4
25	0,250	0,250	0,250	0,250	Y1234	0,9750	20,250	3,750	8,750	33,2	34,1	20,3	3,8	8,8

и Al₂O₃ уменьшаются от 40 до 17 % и от 14 до 8 % соответственно. Добавка до 3 % борного ангидрида в шихту приводит к появлению до 15 % B₂O₃ в конечном шлаке.

Учитывая то, что MgO обладает значительно меньшей десульфуривающей способностью, чем CaO, приняли, что основность должна быть в интервале 0,9 – 1,2. Содержание в доменном шлаке MgO меняется в интервале 15 – 36 %, так как количество MgO менее 15 % слабо влияет на ход плавки. В подавляющем большинстве конечных доменных шлаков при выплавке чугунов в РФ и странах Запада содержание Al₂O₃ меняется от 5 до 20 %.

Таким образом, исследуемая область составов в полной пятикомпонентной системе CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ представлена тетраэдром, вершинами которого являются псевдокомпоненты Y₁; Y₂; Y₃ и Y₄. Для изготовления опытных шлаков, согласно матрице планирования эксперимента, рассчитано точное содержание каждого компонента в шлаке соответствующего состава (табл. 1).

Для проведения экспериментов предварительно были изготовлены синтетические шлаки, содержащие CaO и SiO₂ в соотношении R = 0,9 ÷ 1,2. Взятый для экспериментов оксид кальция (ЧДА) предварительно прокален в муфельной печи при температуре 910 °С в течение 6 ч. Исходные образцы готовили нагревом и плавлением в графитовом тигле смеси оксидов

(CaO–SiO₂) при температуре 1500 – 1550 °С (выдержка 30 мин). Расплав выливали в изложницу и охлаждали.

Полученные шлаки смешивали в соответствующих пропорциях с оксидом магния, прокаленным при 400 °С, оксидом алюминия и борным ангидридом, перед этим проплавленным в печи угольного сопротивления при 900 °С в течение 4 ч. Полученные смеси плавил в графитовом тигле при температуре 1500 – 1550 °С (выдержка 30 мин), выливали в изложницу, охлаждали и измельчали.

Из порошков брикетировали таблетки, помещали их в молибденовый тигель, нагревали до 1550 °С и проводили измерения вязкости. Для этого использовали вибрационный вискозиметр, работающий в режиме вынужденных колебаний [23; 24] с фиксацией температуры расплава вольфрам-ренийевой термопарой. Измерительный щуп был изготовлен из молибдена. Процесс осуществляли в режиме охлаждения со скоростью 5 – 7 °С/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 1 – 4.

На рис. 1 показаны изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания B₂O₃ от 0 до 10 %. В соот-

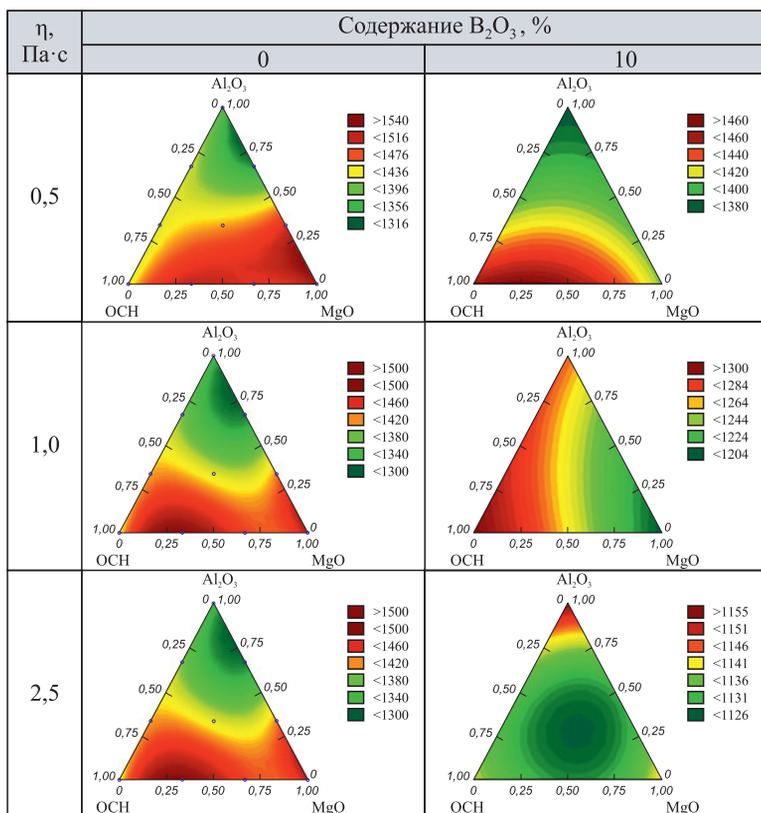


Рис. 1. Изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания B₂O₃ от 0 до 10 %

Fig. 1. Isolines of the temperature response function at which a given viscosity is achieved with an increase in B₂O₃ content from 0 to 10 %

Таблица 2. Результаты экспериментов

Table 2. Experimental results

Номер смеси	Температура шлага, °С при вязкости, Па·с					Вязкость шлага, Па·с при температуре, °С				
	0,4	0,5	0,6	1,0	2,5 ($T_{пл}$)	1550	1500	1450	1400	1350
1	1449	1434	1422	1398	1378	0,120	0,188	0,350	0,680	–
2	1554	1532	1510	1475	1462	0,432	0,651	5,102	–	–
3	1430	1380	1317	1200	1130	0,124	0,295	0,384	0,461	0,548
4	1422	1388	1372	1340	1290	0,162	0,215	0,264	0,461	0,900
5	1532	1513	1479	1448	1440	0,295	0,567	0,807	–	–
6	1545	1493	1430	1323	1140	0,384	0,478	0,548	0,629	0,750
7	1435	1418	1400	1378	1335	0,137	0,210	0,374	0,601	1,314
8	1426	1433	1386	1204	1137	0,124	0,232	0,369	0,461	0,495
9	1350	1330	1319	1314	1306	0,490	0,071	0,113	0,215	0,392
10	1399	1373	1354	1310	1210	0,600	0,103	0,198	0,384	0,629
11	1515	1493	1498	1485	1450	0,287	0,542	2,427	–	–
12	1350	1290	1275	1260	1248	0,110	0,124	0,174	0,315	0,404
13	1435	1409	1407	1398	1387	0,150	0,243	0,364	0,836	7,000
14	1358	1357	1356	1350	1340	0,082	0,096	0,096	0,110	0,994
15	1535	1510	1490	1420	1403	0,305	0,550	0,842	2,800	–
16	1545	1407	1360	1276	1150	0,384	0,461	0,461	0,530	0,608
17	1455	1430	1392	1333	1270	0,174	0,305	0,414	0,536	0,857
18	1510	1454	1420	1397	1388	0,370	0,403	0,524	0,730	1,200
19	1380	1348	1330	1291	1200	0,082	0,215	0,215	0,355	0,478
20	1490	1410	1380	1320	1225	0,248	0,355	0,478	0,548	0,868
21	1418	1416	1415	1409	1400	0,103	0,143	0,198	2,350	–
22	1440	1410	1397	1389	1378	0,105	0,162	0,399	0,495	–
23	1360	1322	1290	1243	1150	0,124	0,162	0,248	0,355	0,414
24	1378	1362	1337	1300	1240	0,103	0,162	0,215	0,325	0,530
25	1426	1377	1356	1282	1258	0,162	0,221	0,335	0,456	0,659

ветствии с результатами, приведенными на рис. 1, видно, что при увеличении содержания в шлаке B_2O_3 , в области симплекса с высоким содержанием MgO , она достигается при меньшей температуре.

На рис. 2 показаны изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении основности шлага от 0,9 до 1,1 ед. В соответствии с результатами, приведенными на рис. 2, видно, что при увеличении основности шлага, в областях симплекса с высоким содержанием MgO и Al_2O_3 , требуемая вязкость достигается при более высокой температуре. При этом, в области симплекса с высоким содержанием B_2O_3 , вне зависимости от основности шлага, требуемая вязкость достигается при достаточно низких температурах – от 1100 до 1300 °С.

На рис. 3 показаны изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания MgO от 15 до 29 %.

Результаты испытаний, приведенные на рис. 3, свидетельствуют, что, несмотря на увеличение MgO в шлаке почти в 2 раза, в области симплекса с максимальным содержанием B_2O_3 , для достижения температуры заданной вязкости требуется незначительное увеличение температуры, не превышающее при минимальной вязкости 1380 °С и 1340 °С при максимальной вязкости.

На рис. 4 показаны изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания Al_2O_3 от 5 до 15 %.

Результаты испытаний, приведенные на рис. 4, свидетельствуют, что увеличение содержания в шлаке содержания Al_2O_3 приводит к снижению температуры достижения требуемой вязкости в области симплекса с максимальным содержанием MgO . Еще больше эта температура снижается при увеличении содержания в шлаке B_2O_3 .

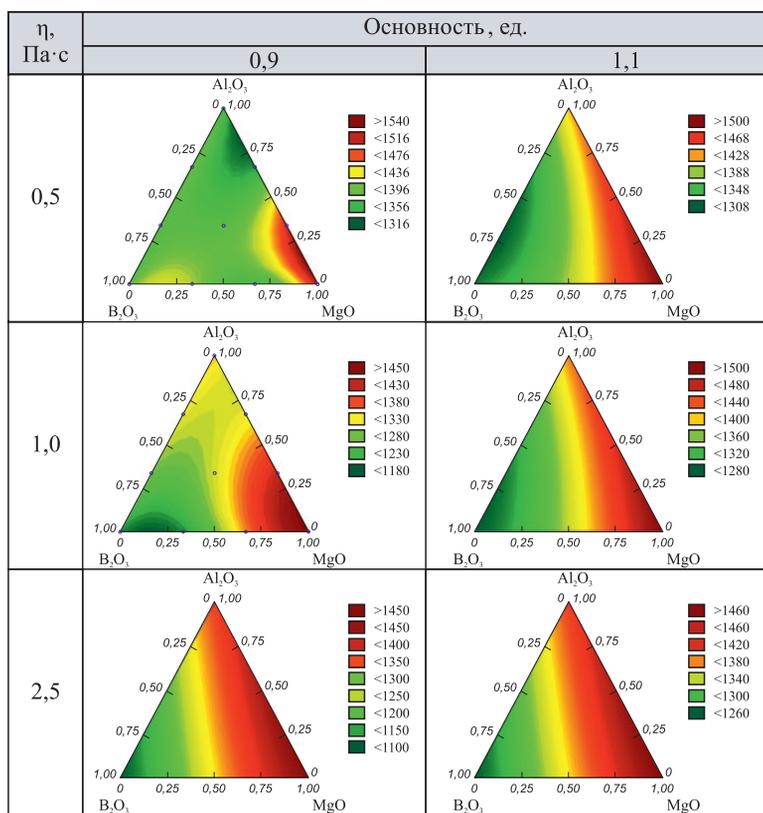


Рис. 2. Изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении основности от 0,9 до 1,1 ед.

Fig. 2. Isolines of the temperature response function at which a given viscosity is achieved with an increase in basicity from 0.9 to 1.1 units

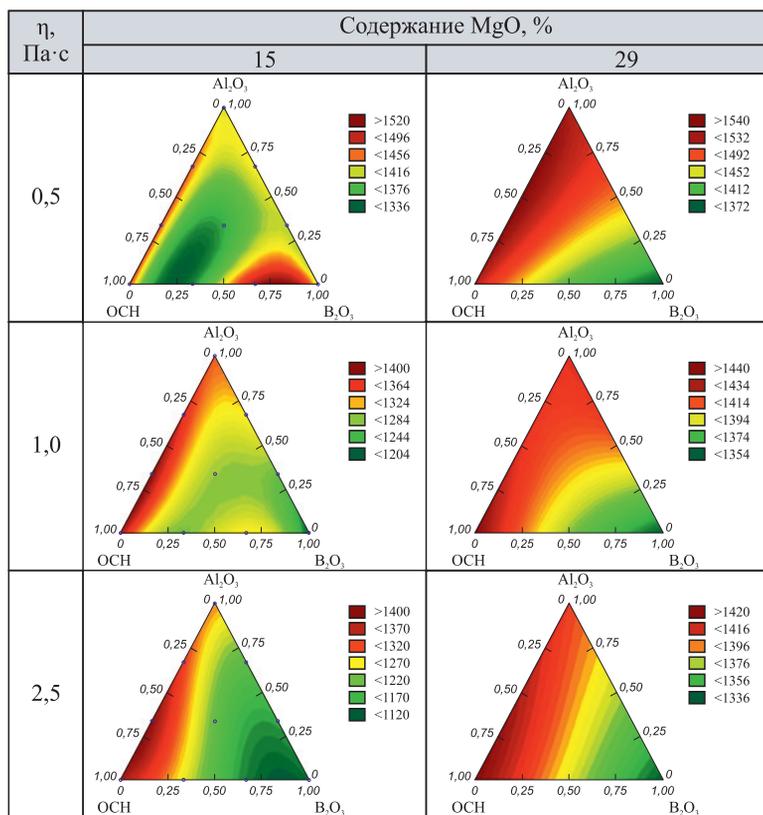


Рис. 3. Изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания MgO от 15 до 29 %

Fig. 3. Isolines of the temperature response function at which a given viscosity is achieved with an increase in MgO content from 15 to 29 %

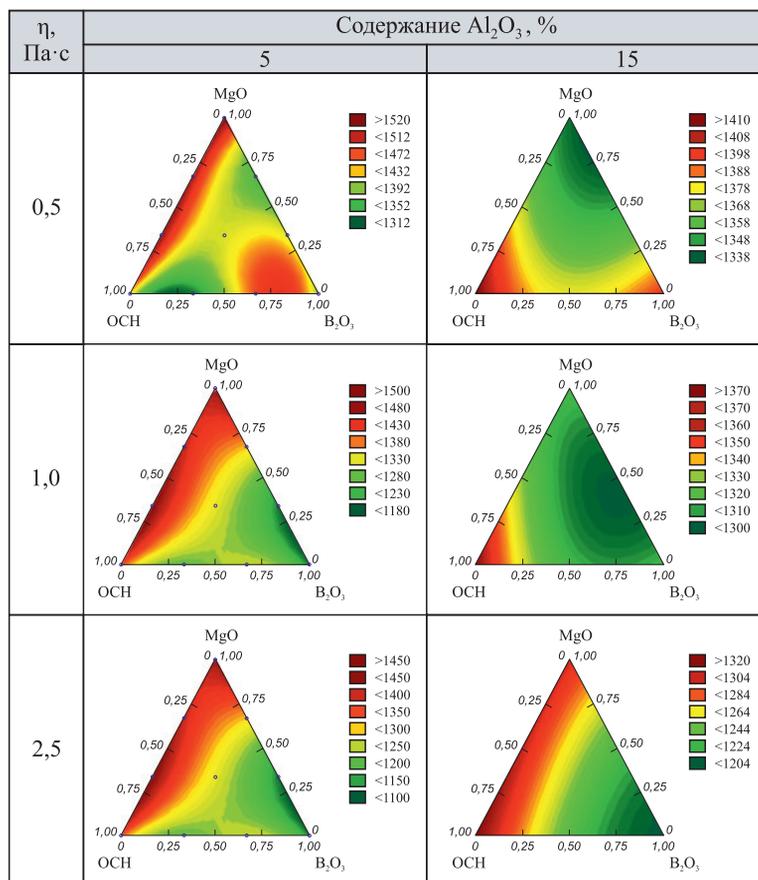


Рис. 4. Изолинии функции отклика температуры, при которой достигается заданная вязкость, при увеличении содержания Al_2O_3 от 5 до 15 %

Fig. 4. Isolines of the temperature response function at which a given viscosity is achieved with an increase in Al_2O_3 content from 5 to 15 %

Во всем диапазоне составов исследованных расплавов системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3$ в отсутствии борного ангидрида температура, принятая за температуру плавления шлака (вязкость 2,5 Па·с), выше 1390 °С. При основности менее 1,1, содержании MgO менее 20 %, а Al_2O_3 более 10 % она находится в интервале 1300 – 1400 °С, а вязкость 0,5 Па·с, соответствующая вязкости шлака на выпуске, достигается при температурах 1300 – 1440 °С при любой основности, если содержание MgO менее 20 %, а соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ более 0,5. Причем, чем выше это соотношение, тем ниже температура. Это говорит о том, что доменная плавка на шлаках такого состава будет протекать без затруднений.

Дальнейшее увеличение содержания оксида магния приводит к резкому увеличению температуры плавления вплоть до 1500 °С с уменьшением интервала кристаллизации, а температуры, при которых достигается вязкость на выпуске, повышаются вплоть до 1540 °С при росте содержания оксида магния до 36 %, что делает плавку на таких шлаках затруднительной или невозможной.

Добавки B_2O_3 приводят к тому, что температура, при которой вязкость расплава равна 2,5 Па·с, снижается, и при содержании в расплаве 15 % B_2O_3 составляет

менее 1150 °С. При наличии борного ангидрида шлаки становятся длинными и устойчивыми.

Выводы

В настоящее время в большинстве доменных шлаков содержание основных компонентов составляет, мас. %: 30 – 40 SiO_2 , 31 – 49 CaO, 3 – 18 MgO, 7 – 20 Al_2O_3 , в незначительных количествах присутствуют MnO (0,1 – 3,0 %), FeO (0,2 – 0,8 %), S (0,8 – 2,2 %). Такие шлаки жидкоподвижны (вязкость менее 0,5 Па·с) при температуре выше 1450 °С. Увеличение содержания оксида магния (>25 %) делает их короткими и тугоплавкими, поэтому доменная плавка на таких шлаках затруднительна. В связи с этим в шихту доменной плавки материалы, изготовленные из сидеритовой руды, по различным технологиям подготовки их к доменной плавке (сырая руда, обжиг-магнитное обогащение, агломерация) вводят только в качестве добавок. Их доля в исходной шихте составляет менее 20 % и подбирается таким образом, чтобы содержание MgO в образующемся шлаке не превышало 15 – 20 %.

Добавление в исходную шихту материалов, содержащих борный ангидрид, позволяет снизить температуру плавления шлака. Это делает возможным веде-

ние доменной плавки на шлаках, содержащих около 40 % MgO, что соответствует доле сидеритов в исходной шихте 40–50 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна*. Москва: Metallurgy; 1988:308–323.
- Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. *Металлургия чугуна*. Москва: ИКЦ «Академкнига»; 2004:774.
- Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Физико-химические проблемы формирования расплавов в доменной печи / *Познание процессов доменной плавки* / Под ред. Большакова В.И. и Товаровского И.Г. Днепропетровск: Пороги; 2006:248–276.
- Плискановский С.Т., Полтавец В.В. *Оборудование и эксплуатация доменных печей*. Днепропетровск: Пороги; 2004:495.
- Badich A., Senk D., Gudenau H.W., Mavrommatis K.Th. *Ironmaking*. Aachen: RWTH Aachen University; 2008:402.
- Большакова Л.И., Жило Н.Л. Физические свойства высокомагнезиальных доменных шлаков при выплавке бакальских сидеритов // *Шлаковый режим доменных печей* / Под ред. Н.Л. Жило и М.Я. Остроухова. Москва: Metallurgy; 1967:173–185.
- Жило Н.Л. *Формирование и свойства доменных шлаков*. Москва: Metallurgy; 1974:120.
- Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. и др. *Свойства жидких доменных шлаков: Справочное пособие*. Москва: Metallurgy; 1975:182.
- Saito N., Hori N., Nakashima K., Mori K. Viscosity of blast furnace type slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2003;34(5):509–516. <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0018-9>
- Kou M., Wu Sh., Ma X., Wang L., Chen M., Cai Q., Zhao B. Phase equilibrium studies of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ system with binary basicity of 1.5 related to blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47(2):1093–1102. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0584-2>
- Liu Y., Lv X.W., Li B., Bai C.G. Relationship between structure and viscosity of CaO–SiO₂–MgO–30.00 wt.% Al₂O₃ slag by molecular dynamics simulation with FT-IR and Raman spectroscopy. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018;45(6):492–501. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1288309>
- Shen F., Hu X., Zheng H., Jiang X., Gao Q., Han H., Long F. Proper MgO/Al₂O₃ ratio in blast-furnace slag: Analysis of proper MgO/Al₂O₃ ratio based on observed data. *Metals*. 2020;10(6):784. <https://doi.org/10.3390/met10060784>
- Das K., Agrawal A., Reddy A.S., Ramma R.V. FactSage studies to identify the optimum slag regime for blast furnace operation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021;74:419–428. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02144-y>
- Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Агафонов С.Н. Оценка эффективности использования Бакальских сидеритов в доменной плавке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(7):504–510. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>
- 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;65(7):504–510. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>
- 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*; 1996:88.
- 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.
- Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. *Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия; 2022:116.
- 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>
- Kim G. H., Sohn I. Role of B₂O₃ on the viscosity and structure in the CaO–Al₂O₃–Na₂O-based system. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014;45(2):86–95. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9953-2>
- Wang G., Wang J.-S., Xue Q.-G. Properties of boron-rich slag separated from boron-bearing iron concentrate. *Journal of Central South University*. 2018;25(4):783–794. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3783-y>
- Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Гуляева Р.И., Сергеева С.В., Тюшняков С.Н. Влияние B₂O₃ на вязкость высокомагнезиальных доменных шлаков. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(1):89–96. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-89-96>
- Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Gulyaeva R.I., Sergeeva S.V., Tyushnyakov S.N. Effect of B₂O₃ on viscosity of high-magnesia blast furnace slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(1):89–96. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-89-96>
- Ким В.А., Николай Э.И., Акбердин А.А., Куликов И.С. *Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков: Методическое пособие*. Алма-Ата: Наука; 1989:116.
- Selivanov E., Gulyaeva R., Istomin S., Tyushnyakov S., Bykov A., Belyaev V. Viscosity and thermal properties of slag in the process of autogenous smelting of copper–zinc concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2015;124(2):88–95. <https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000078>
- Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Dmitriev A.N., Chentsov V.P., Ryabov V.V. Structure sensitive properties of system B₂O₃–CaO melts. *Defect and Diffusion Forum*. 2020;400:186–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.400.186>

Сведения об авторах

Information about the Authors

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

Михаил Аркадьевич Михеенков, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории проблем техногенных образований, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@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 редких тугоплавких металлов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0001-6731-3595

E-mail: agafonovs@ya.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

Mikhail A. Mikheenkov, *Dr. Sci. (Eng.)*, Leading Researcher of the Laboratory of Problems of Man-Made Formations, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@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 Rare Refractory Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0001-6731-3595

E-mail: agafonovs@ya.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

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

М. А. Михеенков – проведение расчетов, анализ результатов исследований.

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

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

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

M. A. Mikheenkov – performing calculations, analysis of the research results.

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

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

Поступила в редакцию 24.03.2025

После доработки 01.04.2025

Принята к публикации 23.04.2025

Received 24.03.2025

Revised 01.04.2025

Accepted 23.04.2025