



УДК 669.162.275.2

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-89-96



Оригинальная статья  
Original article

## Влияние B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на вязкость ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

А. С. Вусихис<sup>1</sup>, Л. И. Леонтьев<sup>1,2,3</sup>, Р. И. Гуляева<sup>1</sup>,  
С. В. Сергеева<sup>1</sup>, С. Н. Тюшняков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>3</sup> Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

✉ vas58@mail.ru

**Аннотация.** На металлургических предприятиях Урала доля местного сырья составляет 50 – 60 %. Его дефицит 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 содержания магния. С ростом количества 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. Синтетический шлак, содержащий 26,8 % CaO, 38,1 % SiO<sub>2</sub>, 11,8 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 23,6 % MgO, моделирующий состав шлака доменной плавки Магнитогорского металлургического комбината с добавкой 30 % обожженных сидеритов, является коротким и неустойчивым. Температура, при которой его вязкость соответствует вязкости на выпуске (0,5 Па·с), составляет 1390 °С, а температура, соответствующая температуре плавления (вязкость 2,5 Па·с), составляет 1367 °С. Если в такой шлак добавить борный ангидрид, он становится длинным и устойчивым. В расплавах при увеличении доли B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 0 до 12 % температура, при которой вязкость шлака составляет 0,5 и 2,5 Па·с, снижается до 1260 и 1100 °С соответственно. Это делает возможным значительное увеличение доли сидеритов в доменной шихте.

**Ключевые слова:** железорудное сырье, бакальские сидериты, вязкость, шлак, оксид бора, оксид магния, температура плавления

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

**Для цитирования:** Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Гуляева Р.И., Сергеева С.В., Тюшняков С.Н. Влияние B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>

## EFFECT OF B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ON VISCOSITY OF HIGH-MAGNESIA BLAST FURNACE SLAG

A. S. Vusikhis<sup>1</sup>, L. I. Leont'ev<sup>1,2,3</sup>, R. I. Gulyaeva<sup>1</sup>,  
S. V. Sergeeva<sup>1</sup>, S. N. Tyushnyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

<sup>3</sup> Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

✉ vas58@mail.ru

**Abstract.** Smelters in the Urals procure only 50 – 60 % of raw materials from local sources. The rest is imported from Central Russia, the Kola Peninsula, and Kazakhstan. Switching to local raw materials would increase the competitiveness of the Urals metals, so local alternatives should be considered, such as siderite ore from the Bakal deposit. The ore is in low demand due to its low iron content and high magnesium content. The higher the siderite content in the charge, the higher the magnesium oxide content in the slag. This affects the slag viscosity, so for

siderite content exceeding 20%, melting is difficult or impossible. We proposed the addition of boric oxide to liquefy the slag. The simulated slag (CaO 26.8 %;  $SiO_2$  38.1 %;  $Al_2O_3$  11.8 %; MgO 23.6 %) identical to that produced by the Magnitogorsk Metallurgical Plant (MMK) blast furnaces with the addition of 30 % of calcined siderite is short and unstable. The temperature when the slag viscosity is equal to that at the blast furnace taphole (0.5 Pa·s) is 1390 °C, while the melting point (2.5 Pa·s viscosity) is 1367 °C. The addition of boric anhydride makes the slag long and stable. As the  $B_2O_3$  content is increased from 0 to 12 %, the temperatures at which the slag viscosity is 0.5 and 2.5 Pa·s decrease to 1260 and 1100 °C, respectively. The study shows it is possible to significantly increase the siderite content in blast furnace charge.

**Keywords:** iron-ore raw materials, Bakal siderites, viscosity, slag, boron oxide, magnesium oxide, melting temperature

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

**For citation:** Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Gulyaeva R.I., Sergeeva S.V., Tyushnyakov S.N. Effect of  $B_2O_3$  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>

На металлургических предприятиях Урала при производстве чугуна доля местного железорудного сырья составляет 50 – 60 %. Его недостаток компенсируется поставками из центральных и северо-западных районов России и Казахстана, поскольку из 50 месторождений железных руд Уральского региона эксплуатируется менее половины [1 – 5], а интенсивность добычи на них часто не совпадает с возможностями. Это происходит вследствие различных причин. В частности, 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 его низкого качества. Доля оксида магния в пустой породе составляет около 40 – 50 % [6 – 8]. В связи с этим в доменной плавке сидериты 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 [9].

В шлаках переход от твердого состояния к жидкому происходит в определенном интервале температур, поэтому температура плавления ( $T_{пл}$ ) является условной величиной. За нее принимают либо температуру ликвидуса ( $T_{л}$ ) – температуру полного исчезновения твердой фазы при нагреве, либо температуру, при которой шлак начинает свободно вытекать из коксовой насадки, что возможно, когда его вязкость становится менее 2,5 Па·с.

Для успешного хода доменной плавки и обеспечения безопасности производства доменной печи температура плавления шлака должна быть ниже 1400 °C, а при температурах от 1400 до 1500 °C он должен обладать хорошей подвижностью [10 – 13].

Процесс медленного загустевания (повышения вязкости) характерен для кислых шлаков. Он протекает в относительно широком интервале температур, в связи с чем шлаки называют «длинными». В основных шлаках при достижении температуры ниже начала кристаллизации шлаки становятся густыми за счет их гетерогенизации и появления твердой фазы. Сгущение происходит в узком интервале температур. Такие шлаки называются «короткими».

Для ведения доменной плавки имеет значение не только температура плавления шлака, но и его текучесть. Поэтому одним из важнейших физико-химических свойств, определяющих стабильность работы и производительность доменной печи, а также имеющих определяющее влияние на доменный процесс, является вязкость шлакового расплава. Корреляция с различными компонентами шлака (в том числе оксидом магния) температуры его плавления и вязкости рассмотрена в исследованиях, результаты которых представлены в большом количестве работ [14 – 21]. В широком интервале содержаний компонентов влияние состава шлака на его свойства описано в работах [14 – 16] и подтверждено в исследованиях в более узком интервале составов [17 – 21].

В основе любого доменного шлака лежит четырехкомпонентная система  $CaO - SiO_2 - MgO - Al_2O_3$ . 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 °C и уменьшению интервала температур загустевания. Шлаки становятся более короткими. Ограничений на количество добавленного оксида магния нет. При температурах ниже 1400 °C шлаки, содержащие более 25 % MgO, не текут.

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

В шлаках, содержащих 5 %  $Al_2O_3$ , минимальная вязкость, соответствующая температуре 1500 °C, составляет 0,15 Па·с в области составов  $R \sim 0,9 - 1,1$ , 17 – 20 % MgO, 36 – 38 %  $SiO_2$ . Снижение температуры до 1400 °C приводит к увеличению минимальной вязкости до 0,35 Па·с и расширению области ее достижения по магнезии до 13 – 20 %, сдвигая в сторону более кислых шлаков с 39 – 41 %  $SiO_2$ .

Увеличение содержания глинозема до 10 % повышает минимальную вязкость. С уменьшением температуры с 1500 до 1400 °C она увеличивается от 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 %  $SiO_2$

(1500 °C) до  $R \sim 1,05 - 1,2$ , 14 – 16 %  $MgO$ , 39 – 41 %  $SiO_2$  (1400 °C) соответственно.

При 15 %  $Al_2O_3$  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 %  $SiO_2$  до  $R \sim 0,80 - 1,05$ , 18 – 22 %  $MgO$ , 33 – 35 %  $SiO_2$  при снижении температуры от 1500 до 1400 °C. С возрастанием количества оксида магния особенно резко снижается вязкость кислых шлаков, содержащих 25 – 35 %  $CaO$ . Такие шлаки с  $R \sim 0,5 - 0,8$ , содержащие 13 – 18 %  $Al_2O_3$  и 16 – 25 %  $MgO$ , достаточно подвижны при 1350 – 1400 °C.

В шлаках, содержащих 20 %  $Al_2O_3$ , в интервале  $R \sim 1,2 - 1,5$  температура плавления выше 1500 °C при любых содержаниях оксида магния. Если  $R \sim 1,1 - 1,2$ , кристаллизация происходит при  $>16$  %  $MgO$ . С уменьшением  $R$  до 0,6 критическое содержание оксида магния увеличивается до 20 %. Если отношение  $MgO/Al_2O_3 \sim 0,5$ , то при  $R \sim 1,1 - 1,2$   $T_{пл}$  близко к 1450 °C, уменьшение  $R$  до 0,6 снижает  $T_{пл}$  до 1350 °C. В таких шлаках минимальная вязкость меняется от 0,4 Па·с (1500 °C) до 1,0 Па·с (1400 °C) при содержании  $SiO_2$  34 – 36 %.

Анализ приведенных данных показывает, что в шлаках с основностью менее 1,0 содержание  $MgO$  может достигать 15 – 20 %, не вызывая больших затруднений в плавке. Такие шлаки достаточно текучи и плавятся при температуре ниже 1350 °C. Увеличение содержания оксида магния выше 25 % приводит к резкому росту температуры плавления, делает шлаки короткими и неустойчивыми. Расчеты показали [22], что такие шлаки образуются при содержании в шихте доменной плавки около 30 % сидеритов. Это позволяет сделать вывод о том, что плавка на такой шихте затруднительна или невозможна.

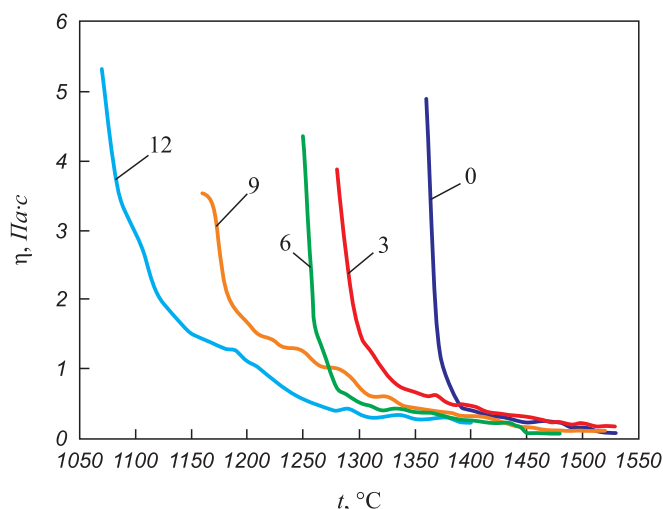


Рис. 1. Политермы вязкости расплавов  $CaO - SiO_2 - MgO - Al_2O_3 - B_2O_3$  (цифры у кривых – содержание  $B_2O_3$ )

Fig. 1. Viscosity polytermes for  $CaO - SiO_2 - MgO - Al_2O_3 - B_2O_3$  melts (the numbers indicate  $B_2O_3$  content)

Однако известно [23 – 25], что добавка в доменные шлаки оксида бора снижает их вязкость во всем диапазоне температур и делает их более длинными.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния добавок оксида бора на вязкость и температуру плавления высокомагнезиальных доменных шлаков.

Для этого был изготовлен синтетический шлак, содержащий 26,8 %  $CaO$ , 38,1 %  $SiO_2$ , 11,8 %  $Al_2O_3$ , 23,6 %  $MgO$ , близкий по составу со шлаком, который по расчетам [22] может быть получен в результате плавки в доменной печи № 9 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) шихты, содержащей смесь из агломерата ММК и окатышей Соколово-Сарбайского ГОКа, взятых в соотношении 2:1, и 30 % обожженного сидеритового концентрата.

Используемый для экспериментов оксид кальция (сча) предварительно был прокален в муфельной печи при температуре 910 °C в течение 6 ч, а борный ангидрид ( $B_2O_3$ ) при 170 °C в течение 2 ч. Последний дополнительно был проплавлен в печи угольного сопротивления при 900 °C в течение 4 ч.

Исходные образцы готовили нагревом и плавлением в графитовом тигле смеси оксидов ( $CaO - SiO_2 - MgO - Al_2O_3$ ) при температуре 1500 – 1550 °C (выдержка 30 мин). Расплав выливали в изложницу и охлаждали. После охлаждения его измельчали, смешивали с борным ангидридом, взятым в количестве, необходимом для достижения в исследуемом расплаве 3, 6, 9 и 12 %  $B_2O_3$ , затем помещали в молибденовый тигель, нагревали до 1550 °C и проводили измерения вязкости. Для этого использовали вибрационный вискозиметр, работающий в режиме вынужденных колебаний [26, 27] с фиксацией температуры расплава вольфрам-рениевой термопарой. Измерительный щуп был изготовлен из молибдена для исключения его взаимодействия с расплавом. Процесс осуществляли в режиме охлаждения со скоростью 5 – 7 °C/мин.

Термический анализ образцов проведен на приборе Netzsch STA 449C Jupiter, предназначенном для совмещенной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). При обработке данных использовали стандартные функции и настройки программного пакета NETZSCH Proteus Thermal Analysis [28], обеспечивающего определение температур с точностью  $\pm 3$  °C. Опыты проводили с нагревом образцов до 1430 °C и охлаждением до 500 °C со скоростью 20 °C/мин в токе аргона особой чистоты (99,998 %  $Ar$ ) в тиглях из сплава Pt-Rh с крышками и подложками из оксида алюминия. Для анализа использовали измельченные образцы массой 23 – 30 мг предварительно сплавленных шлаков. Исследуемые шлаки, кроме основных составляющих ( $SiO_2 - CaO - MgO - Al_2O_3$ ), содержали 0, 6 и 12 % оксида бора.

Рентгенофазовый анализ проведен на дифрактометре XRD-7000 Maxima (Shimadzu) в  $Cu K\alpha$ -излучении в диапазоне углов рассеяния  $2\theta$ , равном 15 – 65°.

Анализ полученных данных (рис. 1) показал следующее. Зависимость вязкости исходного шлака от температуры близка к политерме аналогичного шлака, представленной в работе [15]. При температурах выше  $1390^\circ\text{C}$  вязкость шлака менее  $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . При температуре около  $1370^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{пл}}$ ) она увеличивается до  $2,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Далее происходит интенсивное загустевание шлака. Добавки

борного ангидрида снижают температуру, при которой шлак сохраняет вязкость менее  $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , и увеличивают интервал температур, при котором происходит загустевание шлака до  $T_{\text{пл}}$ . Чем больше оксида бора в шлаке, тем ниже температура его затвердевания.

Термический анализ показал результаты, несколько отличающиеся от полученных при определении вяз-

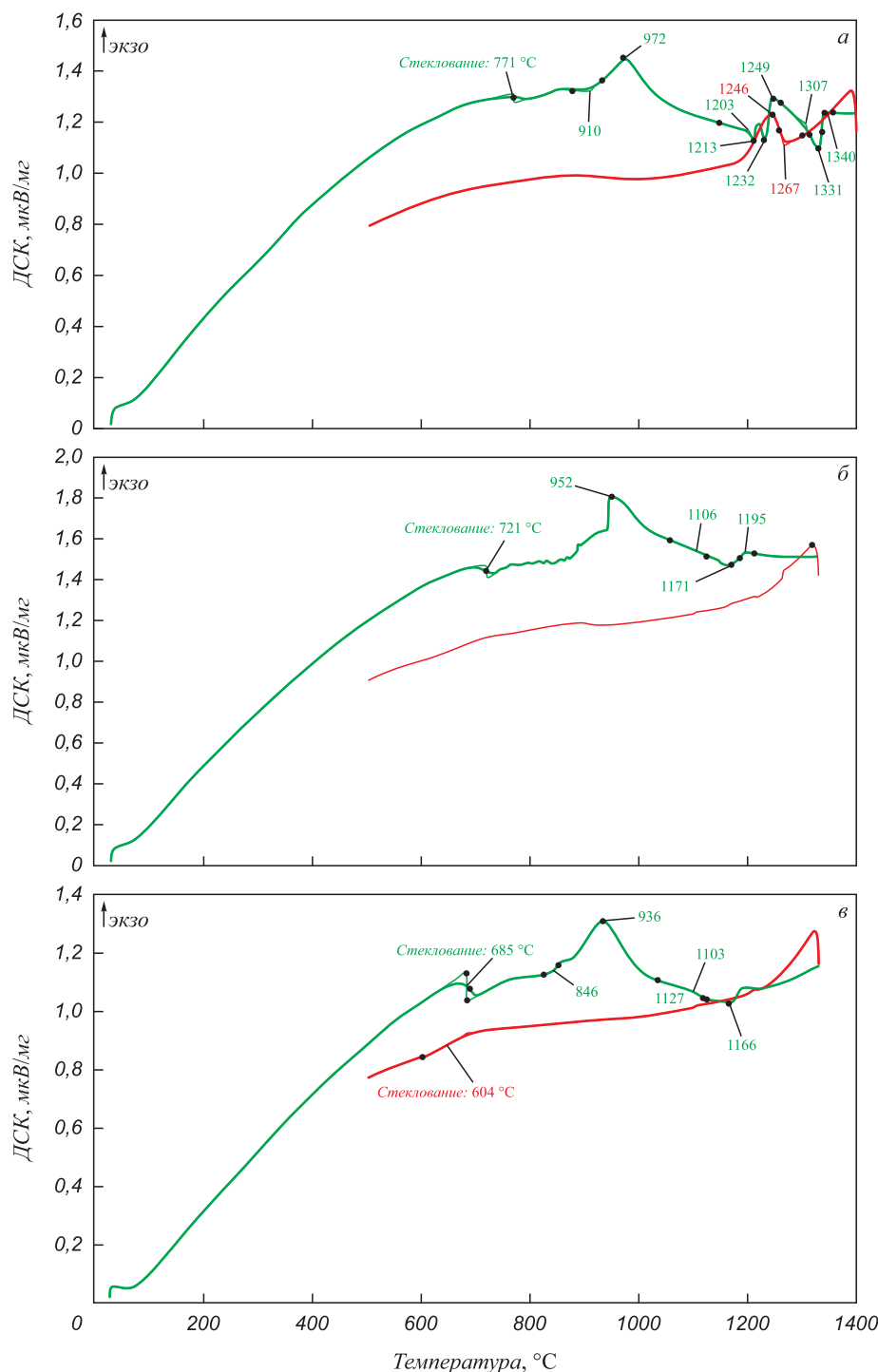


Рис. 2. ДСК линии, полученные при нагревании и охлаждении образцов шлака системы  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (а) с добавлением 6 (б) и 12 (в) %  $B_2O_3$

Fig. 2. DSC curves for heating and cooling of the  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  slag samples (а) 6 %  $B_2O_3$  (б) and 12 %  $B_2O_3$  (в)

кости (рис. 2). При нагреве образца № 1 (рис. 2, а), не содержащего  $B_2O_3$ , на линии ДСК зафиксирован эффект расстекловывания при 771 °С, экзотермический эффект «холодной» кристаллизации с началом при 910 °С и максимумом при 972 °С, а также три эндотермических эффекта с максимумом при 1213, 1232 и 1331 °С, по-видимому, обусловленными плавлением фазовых составляющих шлака. Температура ликвидуса составила 1340 °С. На кривой ДСК охлаждения наблюдается экзотермический эффект кристаллизации расплавленного шлака с началом/максимумом 1267/1246 °С.

Результаты термического анализа образца № 2 (рис. 2, б), содержащего 6 %  $B_2O_3$ , показали образование на ДСК кривой эффекта расстекловывания при 721 °С, а также эффектов «холодной» кристаллизации (952 °С) и плавления (1106/1171 °С). Температура ликвидуса шлака составила 1195 °С. При охлаждении

шлака на ДСК кривой эффектов не наблюдается, что указывает на сохранение его аморфного состояния.

Повышение содержания  $B_2O_3$  до 12,0 % (рис. 2, в) существенно не меняет вид кривых ДСК, при этом выявлено небольшое снижение температуры расстекловывания ( $t_g = 685$  °С) при нагреве и появление эффекта стеклования при охлаждении (604 °С). Эффекты «холодной» кристаллизации и плавления наблюдались при 936 °С и при 1103/1166 °С, что несколько ниже температур, характерных для образцов № 1 и 2.

В целом введение  $B_2O_3$  в шлак системы  $SiO_2 - CaO - MgO - Al_2O_3$  приводит к снижению температур расстекловывания, «холодной» кристаллизации и плавления, способствует формированию и стабилизации аморфной составляющей шлаков.

Это подтвердил и рентгенофазовый анализ (рис. 3). В отсутствие борного ангидрида при охлаждении шлака происходит его кристаллизация. В результате

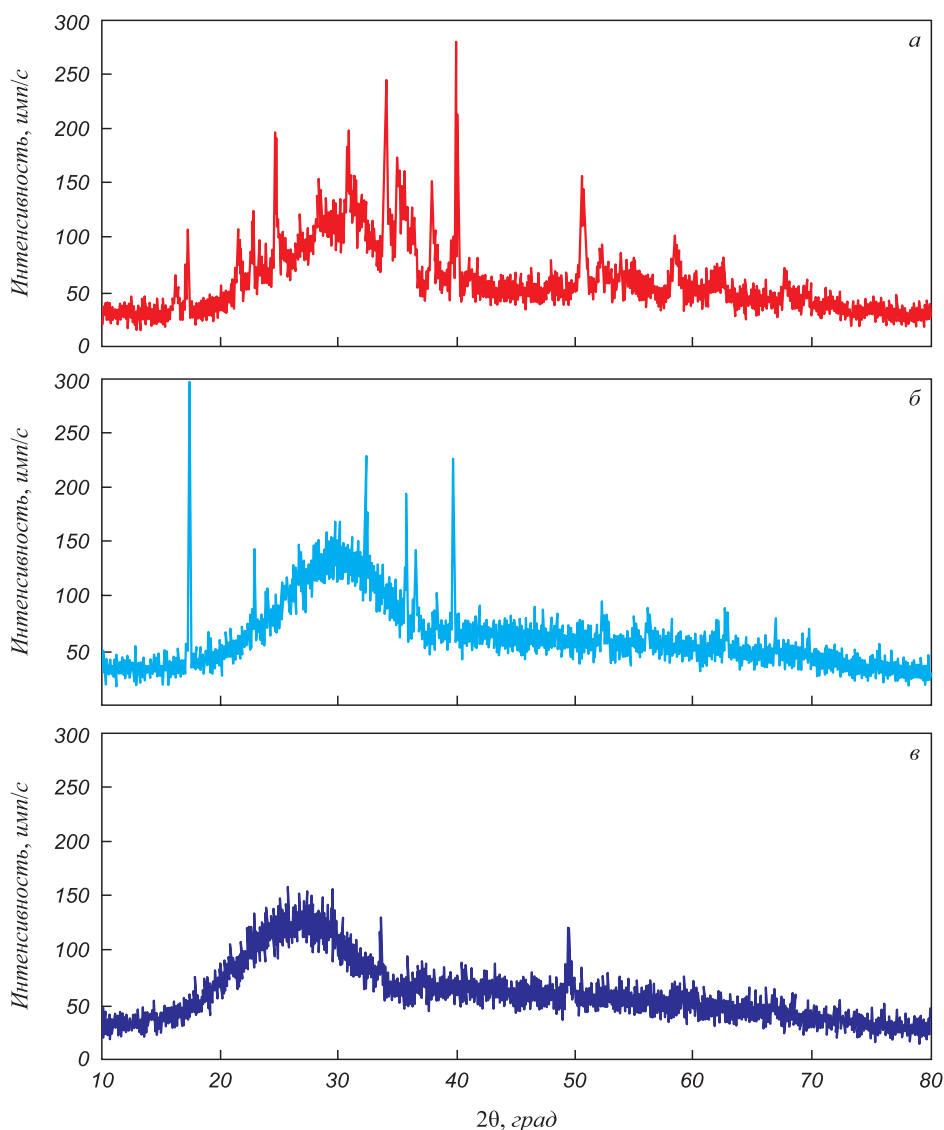


Рис. 3. Диффрактограммы образцов шлака системы  $SiO_2 - CaO - MgO - Al_2O_3$  (а) с добавлением 6 (б) и 12 (в) %  $B_2O_3$

Fig. 3. Diffractograms of the of  $SiO_2 - CaO - MgO - Al_2O_3$  slag samples (a) with addition of 6 %  $B_2O_3$  (b) and 12 %  $B_2O_3$  (c)

образуются алюмосиликаты кальция и магния. При добавлении борного ангидрида в ходе охлаждения происходит стеклование шлака. В результате к алюмосиликатам добавляется боратная составляющая.

## Выводы

В настоящее время в доменной плавке в качестве добавки используют материалы, изготовленные из сидеритовой руды по различным технологиям подготовки их к доменной плавке (сырая руда, обжиг-магнитное обогащение, агломерация). Их доля в исходной шихте подбирается таким образом, чтобы содержание оксида магния в образующемся шлаке не превышало 15–20 %. Такие шлаки жидкоподвижны при температуре выше 1400 °С. Дальнейшее увеличение содержания оксида магния в шлаках делает их короткими и тугоплавкими, поэтому плавка с использованием шихты, содержащей более 30 % сидеритов, в результате которой образуется высокомагнезиальный шлак (>25 %  $MgO$ ), затруднительна. Добавление в исходную шихту материалов, содержащих борный ангидрид, позволяет снизить температуру плавления шлака. В расплаве с исходным содержанием оксида магния 23,6 % добавление борного ангидрида от 0 до 12 % позволяет снизить температуру, при которой вязкость шлака составляет 0,5 Па·с, с 1390 до 1260 °С, а 2,5 Па·с – с 1367 до 1100 °С. Это делает возможным значительное увеличение доли сидеритов в доменной шихте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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 in the Urals. *Gornaya promyshlennost'*. 2006; (4): 57–62. (In Russ.).
2. 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): 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 in the Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007; (5): 286–290. (In Russ.).
3. Пахомов В.П., Душин А.В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УрФО. *Экономика региона*. 2008; (3): 129–143.  
Pakhomov V.P., Dushin A.V. Analysis of the mineral-raw material safety in the Ural Federation District. *Ekonomika regiona*. 2008; (3): 129–143. (In Russ.).
4. Валиев Н.Г., Славиковский О.В., Славиковская Ю.О. Особенности освоения минерально-сырьевой базы на урбанизированных территориях Урала. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012; (6): 344–347.  
Valiev N.G., Slavikovskii O.V., Slavikovskaya Yu.O. Peculiarities of development of mineral resource base in the Urals urbanised territories. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)*. 2012; (6): 344–347. (In Russ.).
5. Корнилов С.В., Кантемиров В.Д. Железорудные месторождения Приполярного Урала как перспективная сырьевая база уральской металлургии. *Известия вузов. Горный журнал*. 2015; (8): 22–28.  
Kornilov S.V., Kantemirov V.D. Iron ore deposits of the Nether-Polar Urals as a prospective raw materials base of the Urals metallurgy. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015; (8): 22–28. (In Russ.).
6. Красноторов В.Я., 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.  
Krasnоторov 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. (In Russ.).
7. 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.  
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: Den' RA; 2016: 428. (In Russ.).
8. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. *Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия; 2022: 116.  
Vusikhis A.S., Leont'ev L.I. *The Use of Siderite Ores in Production of Iron and Steel: Monograph*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2022: 116. (In Russ.).
9. *Slag Atlas*. Düsseldorf, Verlag Stahlissen GmbH; 1995: 616.
10. Готтлиб А.Д. *Доменный процесс*. Москва: Металлургия; 1966: 503.  
Gotlib A.D. *Blast Furnace Process*. Moscow: Metallurgiya; 1966: 503. (In Russ.).
11. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна*. Киев: Выща школа; 1988: 351.  
Efimenko G.G., Gimmel'farb A.A., Levchenko V.E. *Iron-making*. Kiev: Vyshcha shkola; 1988: 351. (In Russ.).
12. 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.  
Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., etc. *Ironmaking*. Moscow: Akademkniga; 2004: 774. (In Russ.).
13. Badich A., Senk D., Gudenau H.W., Mavrommatis K.Th. *Ironmaking*. Aachen, RWTH Aachen University; 2008: 402.
14. Большакова Л.И., Жило Н.Л. Физические свойства высокомагнезиальных доменных шлаков при выплавке бакальских сидеритов. В кн.: *Шлаковый режим доменных печей* / Под ред. Н.Л. Жило, М.Я. Остроухова. Москва: Металлургия; 1967: 173–185.  
Bol'shakova L.I., Zhilo N.L. Physical properties of high-magnesia blast furnace slags during smelting of Bakal siderites. In: *Slag Mode in Blast Furnaces*. Moscow: Metallurgiya; 1967: 173–185. (In Russ.).
15. Жило Н.Л. *Формирование и свойства доменных шлаков*. Москва: Металлургия; 1974: 120.

- Zhilo N.L. *Formation and Properties of Blast Furnace Slag*. Moscow: Metallurgiya; 1974: 120. (In Russ.).
16. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. и др. *Свойства жидких доменных шлаков: Справочное пособие*. Москва: Metallurgiya; 1975: 182.  
Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G., etc. *Properties of Liquid Blast Furnace Slags: Manual*. Moscow: Metallurgiya; 1975: 182. (In Russ.).
  17. 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>
  18. Kou M., Wu S., Ma X., Wang L., Chen M., Cai Q., Zhao B. Phase equilibrium studies of CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>
  19. Liu Y., Lu X.W., Li B., Bai C.G. Relationship between structure and viscosity of CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–30.00 wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>
  20. Shen F., Hu X., Zheng H., Jiang X., Gao Q., Han H., Long F. Proper MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio in blast-furnace slag: Analysis of proper MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio based on observed data. *Metals*. 2020; 10(6): 784. <https://doi.org/10.3390/met10060784>
  21. Das K., Agrawal A., Reddy A.S., Ramna 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>
  22. 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 the use of 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>
  23. Ren S., Zhang J., Wu L. Influence of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on viscosity of high Ti-bearing blast furnace slag. *ISIJ International*. 2012; 52(6): 984–991. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.984>
  24. Kim G.H., Sohn I. Role of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the viscosity and structure in the CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Na<sub>2</sub>O-based system. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014; 45(2): 86–95.  
<https://doi.org/10.1007/s11663-013-9953-2>
  25. 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>
  26. Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Istomin S.A., Belyaev V., Tyushnyakov S., Bykov A. 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>
  27. Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Dmitriev A.N., Chentsov V.P., Ryabov V.V. Structure sensitive properties of system B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO melts. *Defect and Diffusion Forum*. 2020; 400: 186–192.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.400.186>
  28. NETZSCH Proteus Software. *Thermal Analysis*. Version 4.8.3.

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Александр Семенович Вусихис**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии Уральского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-6395-0834  
E-mail: vas58@mail.ru

**Леопольд Игоревич Леонтьев**, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-4343-914X  
E-mail: leo@presidium.ras.ru

**Роза Иосифовна Гуляева**, к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии Уральского отделения РАН  
ORCID: 0000-0003-2860-0377  
E-mail: gulroza@mail.ru

**Светлана Владимировна Сергеева**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии Уральского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-1310-7670  
E-mail: lazarevasv@mail.ru

**Станислав Николаевич Тюшняков**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии Уральского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-0864-0462  
E-mail: tyushnyakov.sn@gmail.com

**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

**Leopold 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

**Roza I. Gulyaeva**, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0003-2860-0377  
E-mail: gulroza@mail.ru

**Svetlana V. Sergeeva**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-1310-7670  
E-mail: lazarevasv@mail.ru

**Stanislav N. Tyushnyakov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-0864-0462  
E-mail: tyushnyakov.sn@gmail.com

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**А. С. Вусихис** – постановка задачи исследования, литературный обзор, подготовка текста, формирование выводов.

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

**Р. И. Гуляева** – проведение экспериментов, обработка результатов.

**С. В. Сергеева** – проведение экспериментов, обработка результатов.

**С. Н. Тюшняков** – проведение расчетов, проведение экспериментов.

**A. S. Vusikhis** – setting the research goal, literary review, writing the text, forming the conclusions.

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

**R. I. Gulyaeva** – conducting experiments, processing results.

**S. V. Sergeeva** – conducting experiments, processing results.

**S. N. Tyushnyakov** – carrying out calculations, conducting experiments.

Поступила в редакцию 06.12.2022

После доработки 14.12.2022

Принята к публикации 30.12.2022

Received 06.12.2022

Revised 14.12.2022

Accepted 30.12.2022