



Оригинальная статья

УДК 669.1:669.781

DOI 10.17073/0368-0797-2021-7-471-476



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРА В МЕТАЛЛУРГИИ. СООБЩЕНИЕ 1

В. И. Жучков¹, О. В. Заякин¹, А. А. Акбердин²

¹ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (Республика Казахстан, 100009, Караганда, ул. Ермакова, 63)

Аннотация. В серии статей, состоящей из двух сообщений, на основании литературных и собственных данных изучено влияние бора на характеристики процессов всех стадий металлургического передела: от агломерации, выплавки чугуна и ферросплавов, до производства стали, а также воздействие бора на свойства получаемого шлака и металла. Для интенсификации процесса упрочнения окатышей на стадии жидкофазного спекания и улучшения металлургических свойств достаточно наличия в них 0,20 – 0,35 % оксида бора. По данным лабораторных исследований, наличие в окатышах оксида бора повышает их прочность на сжатие в 1,5 – 1,7 раза, горячую прочность – в 3 – 4 раза. При изучении механизма и кинетики удаления серы показано, что присутствие борного ангидрида значительно ускоряет процессы десульфурации окатышей и смещает их интенсивное протекание в область более низких температур (1050 – 1100 °С). Для повышения прочностных характеристик агломерата возможна добавка в шихту B_2O_3 . Исследования показали, что ввод 0,44 % B_2O_3 приводит к снижению содержания мелочи (0 – 5 мм) в 1,5 раза по сравнению с базовым образцом и не влияет на истираемость агломерата. Использование борсодержащих окатышей в доменной плавке позволило без технологических осложнений увеличить основность конечного шлака с 1,10 до 1,16, в связи с чем коэффициент распределения серы возрос с 48 до 74. Благодаря этому произошло снижение содержания серы в чугуне на 0,005 %. На основании приведенных теоретических, лабораторно-экспериментальных и промышленных данных показана возможность за счет использования бора и его соединений в процессах подготовки и металлургической переработки рудных материалов повысить технико-экономические показатели производства и качество окатышей, агломератов и чугуна.

Ключевые слова: металлургия, боратовая руда, борный ангидрид, бор, низкотемпературная эвтектика, десульфурация, физико-химические свойства, механические характеристики

Финансирование: Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

Для цитирования: Жучков В.И., Заякин О.В., Акбердин А.А. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 7. С. 471–476. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>

Original article

PROSPECTS FOR USING BORON IN METALLURGY. REPORT 1

V. I. Zhuchkov¹, O. V. Zayakin¹, A. A. Akberdin²

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

² Abishev Chemical-Metallurgical Institute (63 Ermekova Str., Karaganda 100009, Republic of Kazakhstan)

Abstract. On the basis of literature and our own data, the effect of boron on characteristics of all stages of metallurgical processes (from sintering, smelting of cast iron and ferroalloys, to steel production) and on the properties of the resulting slag and metal was studied. To intensify the pellets hardening at the stage of liquid-phase sintering and to improve their metallurgical properties, it is sufficient to have 0.20 – 0.35 % of boron oxide in them. According to the laboratory studies, the presence of boron oxide in pellets increases their compressive strength by 1.5 – 1.7 times and hot strength by 3 – 4 times. While studying the mechanism and kinetics of sulfur removal, it was shown that the presence of boric anhydride significantly intensifies processes of pellets desulfurization. Their intensive progress goes to the zones of lower temperatures of 1050 – 1100 °C. To increase the sinter strength characteristics, it is possible to add B_2O_3 to the charge. The introduction of 0.44 % of B_2O_3 does not affect the sinter abrasion. The content of fines (0 – 5 mm) in comparison with the base sample is reduced by 1.5 times. The use of boron pellets in blast-furnace smelting makes it possible to increase the basicity of the final slag from 1.10 to 1.16. In this regard, the sulfur distribution coefficient increases from 48 to 74. The sulfur content in cast iron decreases by 0.005 %. The possibility of using boron and its compounds to improve the technical and economic indicators of production and the quality of pellets, sinter and cast iron is shown on the base of the presented theoretical, laboratory-experimental and industrial data.

Keywords: metallurgy, borate ore, boric anhydride, boron, low-temperature eutectic, desulfurization, physicochemical properties, mechanical characteristics

Funding: The work was performed in accordance with the State Order of the IMET UB RAS within the framework of the Program of Fundamental Research of State Academies.

For citation: Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 471–476. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>

ВВЕДЕНИЕ

Бор обладает высоким сродством к кислороду и фтору, в связи с чем в свободном виде в природе не встречается, а находится в основном в виде кислородных соединений, реже во фтористых.

Общее содержание бора в земной коре оценивается в $3 \cdot 10^{-4} \%$. Для бора характерно многообразие форм борных соединений и минералов, стремление к обособлению в природных процессах, созданию самостоятельных минералов. Несмотря на малую распространенность, вследствие способности к обособлению бор образует крупные промышленные месторождения [1, 2]. Можно полагать, что в мире общие запасы борного сырья оцениваются величиной более 1 млрд т (в пересчете на борный ангидрид).

Основная масса борного сырья (~53 %) используется в стекольной и керамической промышленности для производства фарфора, эмали, глазури, кислото- и огнеупорных материалов, стекловолокна, оптического стекла и др. Приблизительно 15 % соединений бора применяется для получения мыла, стиральных порошков, отбеливающих средств, 14 % этого сырья используется в сельском хозяйстве для получения микроудобрений. Кроме того, соединения бора (~18 %) применяются в металлургии, медицине (антисептики), в резиновой, кожевенной, лакокрасочной и парфюмерной промышленности.

Несмотря на то, что доля использования бора в металлургии сравнительно невелика, его роль в современных процессах получения металлических изделий значительна. Это обусловлено в основном тем, что:

- бор используется как в виде элементарного бора для ввода в сталь и чугуны, так и в виде оксидов в шлаке [3 – 6];
- бор многофункционален, положительно воздействует на пластические свойства обрабатываемого металла (прокаливаемость, прочностные, пластические свойства, антикоррозионность) [7 – 9];
- бор применяется во многих видах металлопродукции – от углеродистой рядовой до легированной (трубной, нержавеющей) стали и чугуна [10 – 13];
- бор способен улучшать свойства металла и шлака в сверхмалых концентрациях (0,001 – 0,010 % бора в металле, т. е. в 10 – 100 раз меньше, чем других легирующих элементов [14 – 16], и 0,1 – 4,0 % B_2O_3 в шлаках [17 – 20]).

Оценивая состояние сырьевой базы производства борных соединений, можно констатировать наличие больших запасов боросодержащего сырья как в России, так и за рубежом, обеспечивающих развитие всех отраслей промышленности на 100 и более лет даже при наблюдающихся в последние годы высоких темпах

роста производства и потребления борных соединений. Особенностью отечественной сырьевой базы является относительно низкое содержание борного ангидрида в разведанных источниках сырья, обусловленное отсутствием месторождений вулканогенно-осадочного типа [2]. Это выдвигает ряд проблем, для решения которых следует прежде всего активизировать поиски месторождений легко перерабатываемых руд, аналогичных зарубежным, что позволит сократить затраты на разработку технологии их обогащения и производства борных соединений.

Бор в элементарном состоянии и в виде соединений применяется практически на всех стадиях передела в черной и цветной металлургии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оксиды бора были использованы для окускования рудного сырья. Для решения проблемы повышения качества офлюсованных окатышей выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по оценке эффективности использования борного ангидрида и его природных соединений. Целесообразность применения B_2O_3 для этих целей обусловлена его свойствами:

- аномально низкими температурой плавления (450°C) и поверхностным натяжением (95 МН/м против 310, 307, 314 и 690 МН/м соответственно для CaO , SiO_2 , MgO и Al_2O_3);
- большой стеклующей способностью и малой вязкостью содержащих его силикатных расплавов;
- способностью предотвращать силикатный распад высокоосновных агломератов, окатышей, шлаков и при переходе в металл в оптимальных количествах придавать ему высокие эксплуатационные характеристики.

Одним из важнейших свойств борного ангидрида является способность при охлаждении из расплава образовывать стекла самостоятельно или в совокупности с целым рядом оксидов. Данная способность борного ангидрида может широко применяться в процессах подготовки железорудного сырья для предотвращения кристаллизации нежелательных (малопрочных) в связке фаз с целью получения высокопрочных окатышей и агломератов.

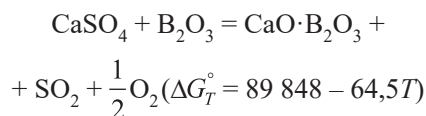
Большинство боросодержащих фаз являются легкоплавкими. Так, с гематитом борный ангидрид образует два низкотемпературных конгруэнтно плавящихся соединения: $Fe_2O_3 \cdot B_2O_3$ (1125°C) и $Fe_2O_3 \cdot 3B_2O_3$ (1280°C). В бинарной системе $Fe_2O_3 - B_2O_3$ имеются также две низкотемпературные эвтектики, плавящиеся соответственно при температурах 975 и 1165°C . Из образующихся в системе $CaO - SiO_2 - Fe_2O_3 - B_2O_3$ фаз, бораты

кальция также являются самыми низкотемпературными. Это, во-первых, указывает на возможность ведения процесса на более низком температурном уровне с целью экономии топлива. Во-вторых, раннее образование «длинной» по своим вязкостным характеристикам жидкой фазы будет способствовать ассимиляции тугоплавких составляющих шихты с получением однородной, хорошо противостоящей термическим нагрузкам связки. Таким образом, присадка в шихту борного ангидрида изменяет направление фазообразования в их связке в сторону появления более устойчивых и прочных фаз, а также должна ускорять формирование конечной структуры окатышей за счет более интенсивной ассимиляции составляющих шихты легкоплавким и хорошо подвижным боратовым расплавом.

По данным лабораторных исследований, наличие в окатышах, содержащих, %: 61,0 – 62,7 Fe; 0,26 – 0,32 FeO; 3,9 – 4,4 CaO; 3,9 – 4,2 SiO₂, оксида бора в количестве 0,3 – 0,5 % повышает их прочность на сжатие в 1,5 – 1,7 раза, одновременно снижая уровень оптимальных температур обжига на 30 – 50 °С (см. рисунок). Это дает возможность сократить потери окатышей от измельчения при транспортировке и уменьшить энергозатраты при их производстве.

Результаты исследований механизма и кинетики удаления серы показывают, что присутствие борного ангидрида значительно интенсифицирует процессы десульфурации окатышей. Если по обычной технологии сера удаляется при 1050 – 1100 °С, то по опытной уже при 300 – 400 °С начинается процесс десульфурации, а наиболее интенсивно сера переходит в газовую фазу

при 950 – 1000 °С. Это обусловлено активным взаимодействием борного ангидрида с сульфатом кальция по реакции



с образованием легкоплавкого бората кальция (1100 °С). Температура начала этой реакции составляет 1119 °С. В отсутствие борного ангидрида взаимодействие сульфата кальция с кремнеземом начинается при $T = 1265$ °С с образованием волластонита, плавящегося при 1450 °С.

Исследования на установке Линдера, выполненные по ГОСТ 19375 – 84, показали, что присутствие B₂O₃ увеличивает прочность окатышей при восстановлении, оцениваемую по выходу фракции класса >10 мм после испытаний (см. таблицу). Если данный показатель для обычных окатышей составляет 14 – 20 %, то для бор-содержащих 39,5 – 91,4 %, т. е. горячая прочность возрастает в 3 – 4 раза. Это должно оказать положительное влияние на интенсификацию доменной плавки, увеличивая расход дутья вследствие снижения газодинамического сопротивления шихты, чему также способствует значительное уменьшение истираемости (<0,5 мм) окатышей.

Для интенсификации процесса упрочнения окатышей на стадии жидкофазного спекания и улучшения металлургических свойств достаточно наличия в них 0,20 – 0,35 % оксида бора.

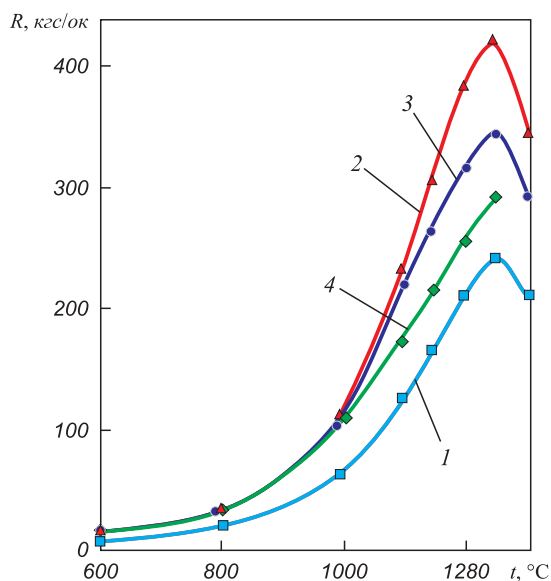
Актуальной современной проблемой является производство высокопрочных агломератов. Производимый в настоящее время агломерат с высокой основностью обладает низкой прочностью [21, 22]. По мнению большинства исследователей, причиной низкой прочности офлюсованных агломератов является наличие в их структуре двухкальциевого силиката (2CaO·SiO₂), полиморфное превращение которого с изменением объема на 10 – 12 % при охлаждении приводит к разрушению агломерата.

При спекании основных (CaO/SiO₂ = 1,25) агломератов в связке, наряду с ферритом кальция, присутствует

Показатели прочности восстановленных окатышей с основностью (CaO/SiO₂) = 1,2

Strength index of reduced pellets with basicity (CaO/SiO₂) of 1.2

Массовая доля B ₂ O ₃ в шихте, %	Выход фракций после восстановления, %		
	>10 мм	5,0 – 0,5 мм	<0,5 мм
0,3	39,5	3,2	4,5
0,5	70,8	1,1	3,8
2,0	91,4	0,3	0,1



Влияние B₂O₃ на прочность обожженных окатышей:
1 – базовые окатыши (не содержащие бор); 2 – 4 – окатыши, содержащие 0,3; 0,5; 2,0 % B₂O₃ соответственно

Influence of B₂O₃ on the strength of roasted pellets:
1 – basic pellets (boron-free); 2 – 4 – 0.3; 0.5; 2.0 % of B₂O₃, respectively

двухкальциевый силикат, который при хранении такого материала на складе постепенно распадается вследствие полиморфного превращения $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. В нем обнаруживается распавшаяся γ -форма $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S).

В случае присадки в шихту боратовой руды и постепенного увеличения ее количества концентрация C_2S уменьшается вследствие преимущественного взаимодействия CaO с B_2O_3 . За счет образующихся при этом боратов количество стекла в связке растет, а имеющийся в базовом агломерате оливин $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ при взаимодействии с высвобождающимся кремнеземом образует пироксеновую фазу геденбергитового состава ($\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_2$), хорошо диагностируемую под микроскопом. Оставшийся двухкальциевый силикат стабилизирован в β -форме борным ангидридом и поэтому агломерат выдерживает длительное хранение без заметных признаков разрушения.

Испытание агломерата с добавкой 0,44 % B_2O_3 в промышленных условиях показало, что его истираемость не изменялась, а содержание мелочи (0 – 5 мм) по сравнению с базовым агломератом уменьшилось в 1,5 раза (с 8,3 до 5,5 %).

Одной из проблем доменного производства является удаление из чугуна серы.

Доменная десульфурация напрямую связана с составом и физико-химическими характеристиками образующихся шлаков. Снижение содержания в чугуне серы за счет роста основности шлака сдерживается ухудшением физико-химических характеристик последнего (вязкости, температур плавления). Регулирование оптимального состава, основности шлака производится за счет различных добавок (флюсов) [23]. В технологии плавки железорудного сырья широкое распространение получили магнийсодержащие добавки (доломит, сидерит, дунит).

По данным работы [24] промышленные опыты по введению магниезальных добавок в доменную шихту (4,1 – 6,5 %) не улучшают показателей плавки, что обусловлено дополнительными затратами тепла на разложение карбонатов, гидратов и формирование шлака, а также ухудшением однородности шихты.

Применение с целью снижения вязкости доменных шлаков CaF_2 , Na_2O , NaCl не получило широкого распространения вследствие образования вредных веществ при их разложении.

В качестве флюса для доменных шлаков целесообразно применять B_2O_3 в виде различных боратов как менее экологически опасных материалов, способных в малых концентрациях воздействовать на свойства шлаков.

Борный ангидрид (B_2O_3) по влиянию на вязкость существенно превосходит MgO и не уступает экологически опасному CaF_2 . При наличии в шлаках B_2O_3 значительно сокращаются поля высоковязких шлаков области кристаллизации геленита.

Результаты исследований показывают, что путем

ввода бора в шихту можно в значительной мере устранить один из главных недостатков доменной плавки титаномagnetитов – большие потери чугуна со шлаком. Причем для этого достаточно содержание в шлаке не более 0,2 % B_2O_3 , что обеспечит наличие в гренали (чугун с повышенным содержанием титана и кремния) 0,0015 – 0,0017 % бора [25]. При больших концентрациях бора помимо указанного эффекта можно ожидать уменьшения расхода кокса, содержания серы в чугуне за счет увеличения подвижности шлака и роста производительности печи вследствие более высокой прочности агломератов и окатышей.

Имеется определенный опыт работы доменных печей уральских заводов с использованием борсодержащих шлаков. На доменной печи объемом 1719 м³ при выплавке ванадиевого чугуна использовался опытный агломерат, содержащий 53,8 % Fe и 0,44 % B_2O_3 . В опытный период концентрация B_2O_3 в шлаке в среднем составляла 0,08 %, а бора в чугуне 0,001 %. Распределение бора при доменной плавке составило: 10,5 % в металл, 86,1 % в шлак, 3,4 % в пыль. Улучшение условий шлакообразования при работе на борсодержащем сырье позволило повысить коэффициент извлечения ванадия в металл, а снижение работы адгезии вызвало уменьшение потерь чугуна со шлаком на 30 % (отн.).

В доменном цехе Магнитогорского металлургического комбината (ММК) были проведены опытно-промышленные плавки чугуна с использованием борсодержащих окатышей Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината (ССГОК) [25]. Загрузка окатышей позволила без технологических осложнений поднять основность конечного шлака с 1,10 до 1,16, в связи с чем коэффициент распределения серы возрос с 48 до 74. Благодаря этому произошло снижение содержания серы в чугуне на 0,005 %. Высокая прочность окатышей как на сжатие, так и при восстановлении, а также хорошая жидкоподвижность шлака, содержащего в среднем 0,25 % B_2O_3 , позволили форсировать работу печи. Интенсивность плавки по руде возросла на 17,4 %, что позволило улучшить КИПО в целом по цеху с 0,579 до 0,489. Удельный расход кокса по фактическим показателям снизился на 14 кг/т чугуна, находясь по абсолютной величине в пределах 432 – 442 кг/т чугуна. Средняя концентрация бора в чугуне составила 0,007 %.

Выводы

Теоретическими, лабораторно-экспериментальными и промышленными испытаниями показана возможность за счет использования бора и его соединений в процессах подготовки и металлургической переработки рудных материалов повысить технико-экономические показатели производства и качество окатышей, агломератов и чугуна. Технология доменной плавки на борсодержащих шлаках может успешно применяться в промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: Издательство Московского Университета, 2004. 444 с.
2. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых миоцен-четвертичных борлитиеносных провинций. М.: Светоч-Плюс, 2010. 304 с.
3. Flethcer J.G., Glasser F.P. Phase relations in system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Journal of Materials Science. 1993. Vol. 28. No. 10. P. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
4. Ghose A., Chopra S., Young J.F. Microstructural characterization of doped dicalcium silicate polymorphs // Journal of Materials Science. 1983. Vol. 18. No. 10. P. 2905–2914. <https://doi.org/10.1007/BF00700771>
5. Zayakin O.V., Kel' I.N. Promising directions for the stabilization of ferroalloy production slags // Materials Science Forum. 2019. No. 946. P. 401–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.401>
6. Заякин О.В., Статных Р.Н., Жучков В.И. Изучение возможности получения неразлагающегося шлака при производстве низкоуглеродистого феррохрома // Металлург. 2018. № 9. С. 25–29.
7. Murari F.D., da Costa e Silva A.L.V., de Avillez R.R. Cold-rolled multiphase boron steels: microstructure and mechanical properties // Journal of Materials Research and Technology. 2015. Vol. 4. No. 2. P. 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.12.001>
8. Mejia I., Bedolla-Jacuinde A., Maldonado C., Cabrera J.M. Hot ductility behavior of a low carbon advanced high strength steel (AHSS) microalloyed with boron // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. No. 13–14. P. 4468–4474. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.040>
9. Chown L.H., Cornish L.A. Investigation of hot ductility in Al-killed boron steels // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 494. No. 1–2. P. 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.026>
10. Asahi H. Overview of development and commercialization of X120 ultra-high strength UOE linepipe // Int. Symp. on Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry. Japan, 2007. P. 281–293.
11. Upadhyay N., Pujar M.G., Sakthivel T., Mallika C., Laha K., Mudali U.K. Effect of addition of boron and nitrogen on the corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo ferritic steel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 86. P. 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.086>
12. Fujishiro T., Hara T., Terada E. etc. Application of B-added low carbon bainitic steels to heavy wall X80 UOE line pipe ultralow temperature use // Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ. 2009. No. 22. P. 640.
13. Asahi H. Development of high grade OCTG and linepipe by utilizing boron addition // Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ. 2009. No. 22. P. 639.
14. Ким А.С., Заякин О.В., Акбердин А.А., Концевой Ю.В. Получение и применение новых комплексных борсодержащих ферросплавов // Электрометаллургия. 2009. № 12. С. 21–24.
15. Жучков В.И., Акбердин А.А., Ватолин Н.А., Леонтьев Л.И., Заякин О.В., Ким А.С., Конуров У.К. Применение борсодержащих материалов в металлургии // Электрометаллургия. 2011. № 3. С. 25–29.
16. Naderi M., Ketabchi M., Abbasi M., Bleck W. Analysis of microstructure and mechanical properties of different hot stamped B-bearing steels // Steel Research International. 2010. Vol. 81. No. 3. P. 216–223. <https://doi.org/10.1002/srin.200900125>
17. Fletcher J.G., Glasser F.P. Phase relations in the system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Journal of Material Science. 1993. Vol. 28. No. 10. P. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
18. Durinck D., Arnout S., Mertens G., Boydens E., Jones P.T., Elsen J., Blanpain B., Wollants P. Borate distribution in stabilized stainless-steel slag // Journal of American Ceramic Society. 2008. Vol. 91. No. 2. P. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02147.x>
1. Eremin N.I. *Non-Metallic Mineral Products*. Moscow: izd. Moskovskogo Universiteta, 2004, 444 p. (In Russ.).
2. Romanyuk T.V., Tkachev A.V. *Geodynamic Case of Formation of the World's Largest Miocene-Quaternary Boron-Lithium-Bearing Provinces*. Moscow: Svetoch-Plyus, 2010, 304 p. (In Russ.).
3. Flethcer J.G., Glasser F.P. Phase relations in system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Journal of Materials Science*. 1993, vol. 28, no. 10, pp. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
4. Ghose A., Chopra S., Young J.F. Microstructural characterization of doped dicalcium silicate polymorphs. *Journal of Materials Science*. 1983, vol. 18, no. 10, pp. 2905–2914. <https://doi.org/10.1007/BF00700771>
5. Zayakin O.V., Kel' I.N. Promising directions for the stabilization of ferroalloy production slags. *Materials Science Forum*. 2019, no. 946, pp. 401–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.401>
6. Zayakin O.V., Statnykh R.N., Zhuchkov V.I. Study of the possibility of obtaining non-decomposing slag during low-carbon ferrochrome production. *Metallurgist*. 2019, vol. 62, no. 9–10, pp. 875–881. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00744-8>
7. Murari F.D., da Costa e Silva A.L.V., de Avillez R.R. Cold-rolled multiphase boron steels: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2015, vol. 4, no. 2, pp. 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.12.001>
8. Mejia I., Bedolla-Jacuinde A., Maldonado C., Cabrera J.M. Hot ductility behavior of a low carbon advanced high strength steel (AHSS) microalloyed with boron. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 528, no. 13–14, pp. 4468–4474. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.040>
9. Chown L.H., Cornish L.A. Investigation of hot ductility in Al-killed boron steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 494, no. 1–2, pp. 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.026>
10. Asahi H. Overview of development and commercialization of X120 ultra-high strength UOE linepipe. In: *Int. Symp. on Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry*. Japan, 2007, pp. 281–293.
11. Upadhyay N., Pujar M.G., Sakthivel T., Mallika C., Laha K., Mudali U.K. Effect of addition of boron and nitrogen on the corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo ferritic steel. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 86, pp. 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.086>
12. Fujishiro T., Hara T., Terada E., etc. Application of B-added low carbon bainitic steels to heavy wall X80 UOE line pipe ultralow temperature use. *Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ*. 2009, no. 22, p. 640.
13. Asahi H. Development of high grade OCTG and linepipe by utilizing boron addition. *Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ*. 2009, no. 22, p. 639.
14. Kim A.S., Zayakin O.V., Akberdin A.A., Kontsevoi Yu.V. Production and application of new complex boron-containing ferroalloys. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, no. 12, pp. 1148–1150. <https://doi.org/10.1134/S0036029510120165>
15. Zhuchkov V.I., Akberdin A.A., Vatin N.A., Leont'ev L.I., Zayakin O.V., Kim A.S., Konurov U.K. Application of boron-containing materials in metallurgy. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 12, pp. 1134–1137. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S003602951112024X>
16. Naderi M., Ketabchi M., Abbasi M., Bleck W. Analysis of microstructure and mechanical properties of different hot stamped B-bearing steels. *Steel Research International*. 2010, vol. 81, no. 3, pp. 216–223. <https://doi.org/10.1002/srin.200900125>
17. Fletcher J.G., Glasser F.P. Phase relations in the system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Journal of Materials Science*. 1993, vol. 28, no. 10, pp. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
18. Durinck D., Arnout S., Mertens G., Boydens E., Jones P.T., Elsen J., Blanpain B., Wollants P. Borate distribution in stabilized stainless-steel slag. *Journal of the American Ceramic Society*. 2008, vol. 91, no. 2, pp. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02147.x>

19. Seki A., Aso Y., Okubo M., Sudo F., Ishizaka K. Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag // *Kawasaki Steel Technical Report*. 1986. Vol. 15. P. 16–21.
20. Pontikes Y., Jones P.T., Geysen D., Blanpain B. Options to prevent dicalcium silicate-driven disintegration of stainless steel slags // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2010. Vol. 55. No. 4. P. 1169–1172. <https://doi.org/10.2478/v10172-010-0020-6>
21. Ефименко Г.Г., Ковалев Д.А. Состояние, проблемы и перспективы подготовки железорудного сырья для металлургического передела // Труды Международной конференции «Теория и практика производства чугуна», 24 – 27 мая 2004 г., Кривой Рог. Кривой Рог: Издательство КГГМК «Криворожсталь», 2004. С. 27–37.
22. Утков В.А. Высокоосновной агломерат. М.: Металлургия, 1977. 156 с.
23. Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И., Заякин О.В., Жучков В.И. Использование российского хромородного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // *Сталь*. 2008. № 4. С. 32–36.
24. Тлегабулов Б.С. Влияние магнийсодержащих добавок на технико-экономические показатели аглодомного производства // Тезисы доклада Всесоюзной конференции «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов», 19 – 27 марта 1990 г., Тула. Тула, 1990. С. 25–27.
25. Акбердин А.А., Ким А.С. Резервы доменного процесса для производства высококачественного стального проката // Труды Международной конференции «Научно-технический прогресс в металлургии», 29 – 30 сентября 2005 г., Темиртау. Темиртау, 2005. С. 148–156.
19. Seki A., Aso Y., Okubo M., Sudo F., Ishizaka K. Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag. *Kawasaki Steel Technical Report*. 1986, vol. 15, pp. 16–21.
20. Pontikes Y., Jones P. T., Geysen D., Blanpain B. Options to prevent dicalcium silicate-driven disintegration of stainless steel slags. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2010, vol. 55, no. 4, pp. 1169–1172. <https://doi.org/10.2478/v10172-010-0020-6>
21. Efimenko G.G., Kovalev D.A. State, problems and prospects for the preparation of iron ore raw materials for metallurgical processing. In: *Proceedings of the Int. Conf. "Theory and Practice of Iron Production"*, May 24 – 27, 2004, Krivoi Rog. Krivoi Rog: KGGMK "Krivorozhstal", 2004, pp. 27–37. (In Russ).
22. Utkov V.A. *Highly Basic Sinter*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 156 p. (In Russ).
23. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Russian chromium ore in smelting high-carbon ferrochrome at ОАО SZF. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 315–317. <https://doi.org/10.3103/S096709120804013X>
24. Tlegabulov B.S. Influence of magnesium-containing additives on technical and economic indicators of sinter-blast furnace production. In: *Theses of the All-Union Conf. "Intensification of Metallurgical Processes and Improving the Quality of Metals and Alloys"*, March 19 – 27, 1990, Tula. Tula, 1990, pp. 25–27. (In Russ).
25. Akberdin A.A., Kim A.S. Reserves of blast-furnace process for production of high-quality rolled steel. In: *Proceedings of the Int. Conf. "Scientific and Technical Progress in Metallurgy"*, September 29 – 30, 2005, Temirtau. Temirtau, 2005, pp. 148–156. (In Russ).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Иванович Жучков, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

Олег Вадимович Заякин, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

Oleg V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

E-mail: zferro@mail.ru

E-mail: zferro@mail.ru

Александр Абдулович Акбердин, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией «Бор», Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева

Aleksandr A. Akberdin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Laboratory "Boron", Abishev Chemical-Metallurgical Institute

E-mail: akberdin_38@mail.ru

E-mail: akberdin_38@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2021

Received 09.06.2021

После доработки 22.06.2021

Revised 22.06.2021

Принята к публикации 26.06.2021

Accepted 28.06.2021