



Оригинальная статья

УДК 669.1:669.781

DOI 10.17073/0368-0797-2021-9-660-668



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРА В МЕТАЛЛУРГИИ. СООБЩЕНИЕ 2

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. Представлены перспективные направления использования бора и его соединений в процессах подготовки, металлургической переработки рудных материалов и выплавки стали с целью улучшения качества конечной продукции. Разработана эффективная технология силикотермического получения ферросиликобора, содержащего 0,6 – 2,0 % В и 60 – 80 % Si. Преимущество данной схемы обусловлено возможностью получения борсодержащего сплава попутно при выплавке ферросилиция. Экспериментально показано, что комплексный ферросиликобор имеет более высокие служебные характеристики, чем ферробор как с позиции его производства, так и применения для обработки стали. Результаты промышленных испытаний технологии микролегирования бором трубных марок стали с использованием нового комплексного ферросплава подтвердили высокую степень усвоения бора – до 96 %. Возможность широкого применения бора для микролегирования стали обусловлена его дешевизной, доступностью и экологичностью. Согласно проведенным расчетам, бор из комплексного ферросиликобора является наиболее дешевым микроэлементом, используемым для повышения прочностных характеристик стали. Добавки B_2O_3 могут успешно использоваться для формирования высокомагнезиальных жидкоподвижных сталеплавильных шлаков. Показано, что 0,37 – 0,55 % B_2O_3 эффективно стабилизирует высокоосновные шлаки сталеплавильного и ферросплавного производств, позволяя устойчиво получать товарный кусковый материал. Приведенный обзор, результаты лабораторных и промышленных исследований показали возможность за счет широкого применения бора на разных стадиях металлургического производства повышать технико-экономические показатели производства и качество стали и ферросплавов, эффективно утилизировать отвальные шлаки. Выдвинутые и проверенные на металлургических предприятиях технические решения не требуют капитальных затрат и реализуются присадкой микродоз бора и его соединений в объекты металлургического производства.

Ключевые слова: металлургия, бор, ферросплав, сталь, шлак, физико-химические характеристики, микролегирование, стабилизация

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 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 9. С. 660–668. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-660-668>

Original article

PROSPECTS FOR USING BORON IN METALLURGY. REPORT 2

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. The second part of the article presents perspective directions of using boron and its compounds in the preparation processes, metallurgical processing of ore materials and steel smelting in order to improve the quality of the final product. An efficient technology of silicothermal production of ferrosilicoboron containing 0.6 – 2.0 % B and 60 – 80 % Si has been developed. The advantage of this scheme is the possibility of obtaining a boron-containing alloy during ferrosilicon smelting. It has been experimentally shown that ferrosilicoboron has higher performance characteristics than ferrobore both in production and when used for steel processing. The results of industrial tests of the technology for microalloying pipe grades of steel with a new ferroalloy with boron confirmed a high degree of boron assimilation – up to 96 %. The possibility of widespread use of boron for steel microalloying is due to its cheapness, availability and environmental friendliness. According to the calculations, boron from complex ferrosilicoboron is the cheapest trace element used to increase the strength characteristics of steel. Additives of B_2O_3 can be successfully used to form high-magnesium liquid steel-making slags. It is shown that 0.37 – 0.55 % B_2O_3 effectively stabilizes the highly basic slags of the steel and ferroalloy industries. This operation allows obtaining a marketable lump material. The above review, results of the laboratory and industrial studies have shown the effectiveness of boron usage at different stages of metallurgical production. An increase in technical and economic indicators of production and quality of steel and ferroalloys, and effective disposal of waste slags is shown. The technical solutions advanced and tested at metallurgical enterprises do not require capital expenditures. They are implemented by adding microdosing of boron and its compounds to metallurgical production facilities.

Keywords: metallurgy, boron, ferroalloy, steel, slag, physical and chemical characteristics, microalloying, stabilization

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 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 9, pp. 660–668. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-660-668>

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях производства бор вводится в металлический расплав в виде ферросплавов. В России и за рубежом применяется, в основном, ферробор, содержащий 6 – 24 % В [1, 2].

Кроме ферробора, для легирования стали и чугуна бором применяются комплексные борсодержащие ферросплавы. Использование этих сплавов повышает эффективность легирования сталей бором по сравнению с ферробором [3].

В состав комплексных сплавов включены технологически необходимые элементы, усиливающие эффект микролегирования бором (Si, Al, Ti, Ca). Эти сплавы в России и за рубежом выпускаются в большом ассортименте.

Борсодержащие ферросплавы производятся карбо-, алюмини- и силикотермическими методами восстановления бора из оксидов, а также переплавом металла различного состава.

Восстановление бора углеродом до карбида B_4C термодинамически более предпочтительно. Поскольку карбид бора является очень прочным химическим соединением, то при карботермии полученные сплавы будут неизбежно содержать до 2 % С.

Совместное восстановление углеродом бора и кремния из оксидов позволяет получать высококремнистые сплавы с невысоким содержанием углерода. Процессы карботермического получения борсодержащих комплексных ферросплавов при совместном восстановлении бора, кремния, марганца, никеля имеют большое распространение.

Алюминотермический способ получения сплавов с бором приобрел широкое распространение благодаря высокой восстановительной способности алюминия. Этим способом получают самый распространенный в мире борсодержащий ферросплав – ферробор.

В качестве основного материала при выплавке ферробора с повышенным содержанием бора (марки ФБ20 и ФБ17) используется борный ангидрид (95 % B_2O_3) или борная кислота (52 – 55 % B_2O_3). Ферробор с пониженным содержанием бора (6 – 10 %) получают с применением боратовой руды (8 – 20 % B_2O_3 ; 1,5 – 10 % SiO_2 ; 15 – 25 % CaO ; 10 – 30 % MgO ; 3 – 5 % FeO). В боратовой руде содержится большое количество кристаллизационной влаги, углерода и серы. Для удаления вредных примесей боратовую руду необходимо подвергать обжигу в трубчатой печи при 700 – 800 °С.

Как правило, в качестве восстановителя для алюминотермического производства ферробора марок ФБ20 и ФБ17 используется порошок первичного алюминия, для ферробора остальных марок восстановителем служит вторичная алюминиевая стружка. Железо вводится в состав шихты в виде низкофосфористой железной руды или прокатной железной окалины. Основной флюсующей добавкой в шихте для получения ферробора служит свежееобожженная известь.

Ферробор имеет недостатки, заключающиеся в применении при его получении дорогостоящих шихтовых материалов (алюминия, борного ангидрида), низкой степени и стабильности усвоения бора при микролегировании стали.

Широкое применение бора для микролегирования стали обусловлено его дешевизной и доступностью, безопасностью применения и экологичностью.

В металлургии бор используют для модифицирования и микролегирования [4 – 10]:

- чугунов всех основных классов (ковких, серых, модифицированных, белых) с целью воздействия на формирование литой структуры и регулирования графитизации;
- конструкционных низколегированных и высокопрочных сталей для повышения прокаливаемости и механических характеристик;
- жаропрочных сталей и сплавов на основе железа, хрома и никеля для повышения механических и жаропрочных свойств при повышенных температурах;
- коррозионностойких сталей и сплавов на основе железа, хрома и никеля для повышения их пластичности при горячей деформации, увеличения сопротивляемости межкристаллитной коррозии (МКК) в слабоокислительных средах и коррозионного растрескивания;
- нержавеющих сталей различных структурных классов, используемых в атомной энергетике, в том числе и для изготовления элементов биологической защиты;
- литых тугоплавких сплавов на основе молибдена и вольфрама для измельчения структуры и рафинирования металла от кислорода, повышения его высокотемпературной пластичности;
- аморфных борсодержащих сплавов.

Микролегирование стали бором обеспечивает повышение устойчивости аустенита к распаду при его переохладении [11] и, как следствие, увеличение эффективности прокаливаемости. Известно, что микролегирование низкоуглеродистой стали бором способствует увеличению глубины закаленного слоя в два раза.

Если марганец, хром и молибден улучшают прокаливаемость стали при введении в повышенных количествах, то положительное влияние бора проявляется при очень малых его концентрациях. Оптимальное количество бора, вызывающее наибольшее увеличение прокаливаемости конструкционной стали, определяется ее составом и по данным различных авторов колеблется в пределах 0,0005 – 0,0100 %.

Эффективность введения бора уменьшается с повышением температуры аустенизации. В отличие от бора, такие легирующие элементы, как марганец, хром и молибден улучшают прокаливаемость с повышением температуры предварительного нагрева под закалку.

Бор может влиять на свойства стали следующим образом [12 – 16]:

- повышать пластичность;
- уменьшать отрицательное влияние свободного азота путем связывания его в боро- и карбоборонитридные соединения, что увеличивает пластичность и деформируемость проката при холодном формоизменении;
- улучшать деформируемость неметаллических включений.

Автор работы [17] считает, что микролегирование бором является одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных и механических характеристик, экономии дефицитных легирующих элементов. Вследствие получения высокой прокаливаемости, прочности и пластичности в катаном и нормализованном состоянии, а также хорошей свариваемости, бор широко применяется при производстве низколегированной стали. Бор имеет невысокую раскислительную способность, но образует стойкие нитриды. Оптимальное содержание бора в стали составляет 0,001 – 0,005 %. При более высоком содержании (0,005 – 0,008 %) он образует легкоплавкую эвтектику, располагающуюся по границам зерен, что снижает прочностные свойства стали при нагреве, поэтому содержание бора в стали строго регламентируется.

Показано, что комплексное легирование позволяет предотвратить трансформацию и измельчить микроструктуру в отливках [1, 18 – 21]. Отмечается склонность бора образовывать нитриды, поэтому авторы рекомендуют при раскислении и дегазации металла использовать активные элементы для большей эффективности введения малых добавок бора, так как на прокаливаемость влияет так называемый эффективный, т. е. находящийся в растворе бор.

Особое значение имеет использование бора при производстве современных высокопрочных сталей для магистральных трубопроводов. Это связано с тем, что традиционные способы упрочнения трубных сталей на сегодняшний день практически исчерпаны. Современные трубные стали отличаются мелкозернистой структурой, основной составляющей которой является бейнит. При этом установлено, что чем выше класс

прочности трубной стали, тем большей должна быть концентрация бейнита в ее структуре.

Перспективы использования бора в России могут возрасти при условии получения стабильных результатов исследований его усвоения и определения оптимальных концентраций в металле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность легирования бором значительно повышается при совместном его вводе в сталь ферросплавами с химически активными элементами (Al, Si, Ti, Zr). Назначение активных компонентов ферросплава состоит в основном в том, чтобы связывать содержащиеся в стали кислород и азот в прочные соединения, предотвращая их взаимодействие с бором. Кроме того, эти компоненты положительно влияют на структуру стали.

В связи со сверхмалым содержанием бора в стали, целесообразно использовать борсодержащий ферросплав с пониженным до 0,6 – 3,0 % В. Это дает возможность увеличить массу вводимого в сталь борсодержащего сплава, повысить степень и стабильность усвоения бора.

Для выполнения указанных условий требуется применение комплексных (многокомпонентных) борсодержащих ферросплавов. Комплексные ферросплавы (КФ) следует создавать в наиболее благоприятных сочетаниях компонентов, способствующих необходимому эффективному воздействию на железоуглеродистый расплав и структуру твердого металла при высокой степени усвоения в нем полезных элементов. Следует отметить, что для получения комплексных ферросплавов можно применять рудное сырье менее высокого качества, чем для выплавки стандартных сплавов. Например, некондиционные материалы, отходы производства, бедные и комплексные руды и концентраты [22]. Из-за невысокой цены нетрадиционного сырья, возможности его использования и утилизации стоимость КФ будет более низкой, появится новая сырьевая база ферросплавного производства [23, 24].

Практика производства ферросплавов показывает, что благодаря более гибкому регулированию технологическими параметрами процесса выплавки КФ, например составом и температурой плавления шлака, размягчением и электросопротивлением шихты, удастся получить сплавы в плавильных агрегатах с более высокими технико-экономическими показателями. Кроме того, КФ можно получать другими методами, например суспензионной разливкой. Данный метод заключается во вводе в жидкий ферросплав, находящийся в мульде разливочной машины конвейерного типа во время разливки, материала другого состава, который, растворившись, изменяет состав первоначально разливаемого металла.

Проведены исследования, направленные на разработку рационального состава и эффективной техно-

логии получения новых комплексных ферросплавов с бором.

Для определения характеристик и рационального состава КФ в ИМЕТ УрО РАН разработана и использована комплексная схема, включающая следующие стадии:

– предварительный подбор элементов в сплаве в соответствии с составом и заданными свойствами обрабатываемых металлов;

– определение рационального соотношения элементов на основе изучения физико-химических свойств сплавов и особенностей их взаимодействия с обрабатываемым расплавом [25].

В табл. 1. приведены составы изученных комплексных борсодержащих ферросплавов и их основные физико-химические характеристики: t_n – температура начала кристаллизации; ρ – плотность; $C_{тв}$, $C_{ж}$ – удельная теплоемкость твердых и жидких сплавов; L – теплота плавления; λ – теплопроводность; τ_{Σ} – общее время плавления ферросплава; $\Sigma\Delta T$ – суммарное изменение температуры стали при введении в нее 1 % сплава [2].

Сравнение характеристик сплавов систем Fe–Si–В и Fe–В показывает, что все кремнистые сплавы имеют более благоприятные служебные характеристики: у них ниже t_n (1273 – 1480 °С против 1430 – 1540 °С), плотность, τ_{Σ} и $\Sigma\Delta T$.

При разработке эффективной технологии получения ферросиликобора учитывали, что высококремнистый сплав целесообразно получать силикотермическим способом.

Были проведены физико-химические расчеты и экспериментальные плавки по определению основных технологических параметров процесса. В качестве рудного борсодержащего сырья целесообразно использование турецкого колеманита, содержащего, %: 37 – 40 B_2O_3 ; 25 – 30 CaO; 2 – 9 SiO_2 ; ~2 MgO. В прокаленном колеманите содержание B_2O_3 достигает 47 – 49 %.

В лабораторных условиях в высокотемпературной электропечи изучали восстановление бора из колеманита кремнием ферросилиция (65 и 75 % Si) при температурах 1550 – 1650 °С. При увеличении времени взаимодействия реагентов до 15 – 20 мин повышается K_B (степень перехода восстановленного бора в сплав) на 25 – 30 %, значения K_B достигают 65 – 70 %. Усвоение бора при получении сплавов с 1 и 2 % В различается незначительно.

Важным звеном в технологии получения комплексного ферросплава является подготовка борсодержащих сырьевых материалов. Борсодержащие материалы должны обеспечивать получение ферросиликобора требуемого состава. К ним могут относиться, например, плавильный или прокаленный колеманит в виде порошка или брикетов, либо другие аналогичные материалы,

Таблица 1

Химический состав и физико-химические характеристики борсодержащих ферросплавов

Table 1. Chemical composition and physicochemical characteristics of boron-containing ferroalloys

Номер п/п	Сплав	Содержание*, %		Характеристики сплавов							
		B	Si	t_n , °C	ρ , кг/м ³	$C_{тв}$, Дж/(кг·град)	$C_{ж}$, Дж/(кг·град)	L , кДж/кг	λ , Вт/(м·град)	τ_{Σ} , с	$\Sigma\Delta T$
1	ФСБ 25/1	1	25,0	1395	6200	486	770	328	25,7	91,2	-19,5
2	ФСБ 25/5	5	24,0	1418	6000	304	780	1092	24,7	101,1	-27,0
3	ФСБ 25/10	10	23,0	1443	5570	526	793	1249	23,5	115,2	-43,4
4	ФСБ 45/1	1	44,5	1275	5520	527	800	1253	25,7	86,8	-18,8
5	ФСБ 45/2	5	43,0	1350	5340	540	832	1354	24,7	91,1	-24,0
6	ФСБ 45/3	10	40,5	1400	5160	568	869	1456	23,5	102,1	-35,0
7	ФСБ 75/1	1	74,0	1258	3820	608	846	1600	25,7	72,8	-6,8
8	ФСБ 75/5	5	71,0	1273	3530	611	862	1650	24,7	68,6	-16,6
9	ФСБ 75/10	10	68,0	1358	3390	619	880	1700	23,5	71,2	-24,5
10	СБ 1	1	99,0	1410	2800	708	919	1813	25,7	71,1	+19,4
11	СБ 5	5	95,0	1390	2670	714	934	1836	24,7	66,0	+2,6
12	СБ 10	10	90,0	1480	2540	722	954	1860	23,5	82,9	-23,9
13	ФБ 1	1	–	1460	7800	440	745	338	25,7	113,7	-35,9
14	ФБ 5	5	–	1230	7550	454	754	639	24,7	90,5	-33,4
15	ФБ 10	10	–	1430	7250	471	781	913	23,5	104,5	-31,3
16	ФБ 15	15	–	1540	6850	469	779	1113	22,2	125,2	-24,4

* Остальное железо

при обработке которыми не наблюдается пыле- и газо-выделений, превышающих существующие нормы.

На основании проведенных исследований разработана эффективная технология силикотермического получения ферросиликобора, содержащего 0,6 – 2,0 % В и 60 – 80 % Si. Способ заключается в восстановлении бора из боратового сырья кремнием ферросилиция при вводе этого сырья в ковш во время выпуска сплава из рудовосстановительной электропечи [26].

Выбор данной технологии обусловлен:

- возможностью получения борсодержащего сплава попутно, при выплавке ферросилиция;
- широким развитием производства ферросилиция и применением его практически на всех марках стали;
- простотой ввода ферросиликобора в сталь без изменения технологии ее выплавки.

Химический состав полученного металла представлен в табл. 2.

Таким образом, предложенный комплексный ферросплав ферросиликобор имеет более высокие служебные характеристики, чем ферробор или другие борсодержащие сплавы, а внепечная технология его получения не требует специальных энергозатрат и плавильного оборудования, дорогого боратового сырья, отличаясь простотой и низкими производственными затратами.

В ЭСПЦ ОАО «СТЗ» проведены промышленные испытания технологии микролегирования бором трубных марок стали с использованием нового комплексного ферросплава – ферросиликобора, содержащего 0,9 % В, 63 % Si, остальное – Fe [2], обеспечившего, без усложнения существующей технологической схемы получения металла, достаточно высокую степень усвоения бора (до 96 %). При этом в течение всего времени внепечной обработки сталь характеризовалась стабильным содержанием бора.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность восстановления бора из оксидной системы углеродом и алюминием стали (прямое легирование бором). На опытном металле, микролегированном бором таким способом (0,0025 – 0,0035 %), отмечено снижение склонности к старению, увеличе-

ние толщины плотной корки слитка, снижение содержания серы и фосфора в стали, уменьшение концентрации оксидных и сульфидных включений.

Для формирования жидкоподвижных высокоосновных шлаков с лучшими рафинирующими свойствами взамен плавикового шпата использовались материалы с B_2O_3 . Результаты лабораторных экспериментов показали, что шлаки основностью 5,0, содержащие 15 – 30 % Al_2O_3 , 8 % MgO и 4 % B_2O_3 , в диапазоне температур 1500 – 1550 °С характеризуются низкой вязкостью, не превышающей 0,15 Па·с. При этом выдержка глубоко раскисленного металла, содержащего 0,21 % С, 0,79 % Mn, 0,35 % Si и 0,028 % Al под шлаком указанного выше состава при температуре 1600 °С, наряду с глубокой десульфурацией, сопровождается микролегированием стали бором.

При использовании основных борсодержащих рафинировочных шлаков степень десульфурации опытного металла, раскисленного алюминием и кремнием, достигает в среднем 22,2 – 23,1 % против 12,5 – 16,7 % на плавках текущего производства, обеспечивая содержание серы в стали на уровне 0,010 – 0,014 %.

Экспериментально показано, что способность получения жидкоподвижного шлака за счет ввода в него B_2O_3 может быть успешно использована для формирования высокомагнезиальных шлаков, которые позволяют значительно снизить износ магнетитовой футеровки сталеплавильных агрегатов.

Проводилось сравнение степени воздействия ниобия, ванадия и бора на показатели качества стали и сделана попытка дать в стоимостном выражении приближенную оценку эффективности микролегирования стали этими элементами [27]. Результаты сравнительного анализа усредненных значений расхода микроэлементов на обработку и стоимость улучшения свойств стали приведены в табл. 3.

Расход элемента на единицу увеличения σ_b отражает количество микроэлемента, необходимого для повышения временного сопротивления 1 т стали на 1 кг/мм² (10 Н/мм²). Стоимость увеличения единицы σ_b микроэлементами характеризует затраты предприятия, необходимые для повышения прочности 1 т стали на 1 кг/мм² различными микроэлементами.

Согласно проведенным расчетам, наиболее дорогим микроэлементом, используемым для повышения прочностных характеристик, является ниобий. Микролегирование стали ванадием в целях повышения прочностных характеристик металла без учета специальных свойств также является достаточно дорогим. Бор рассматривали как в составе традиционного ферробора (ФБ17), так и нового сплава – ферросиликобора (ФСБ). Микролегирование бором является наиболее дешевым из перечисленных. В качестве борсодержащего ферросплава экономически более выгодно использовать ферросиликобор, стоимость бора в котором значительно ниже.

Таблица 2

Химический состав ферросиликобора, %

Table 2. Chemical composition of ferrosilicoboron, %

Номер слитка*	Cr	Si	Al	B
1	0,50	64,70	0,80	0,91
2	0,50	64,50	0,80	0,84
3	0,30	63,40	0,90	0,91
4	0,20	65,00	0,80	0,78
Среднее	0,38	64,40	0,83	0,86

* Пробы отобраны от разных слитков.

Расход микроэлементов на обработку стали и стоимость улучшения ее прочностных свойств

Table 3. Microelements consumption for steel processing and cost of improving its strength properties

Показатель	Элемент ферросплава			
	ниобий	ванадий	бор (ФБ17)	бор (ФСБ)
Цена 1 кг элемента в ферросплаве на российском рынке, руб.	1583	1250	1235	791
Среднее содержание элемента в стали, %	0,040	0,070	0,003	0,003
Коэффициент усвоения сталью легирующего элемента	0,83	0,83	0,70	0,92
Средний расход и стоимость элемента на 1 т стали	кг	0,480	0,840	0,043
	руб.	760	1050	53
Средние показатели улучшения σ_v при среднем расходе элемента*	$\frac{6-8}{7}$	$\frac{5-17}{11}$	$\frac{3-10}{6}$	$\frac{3-10}{6}$
Расход элемента на единицу увеличения σ_v , кг	0,0690	0,0760	0,0070	0,0055
Стоимость увеличения единицы σ_v микроэлементом, руб.	109,20	95,00	8,60	4,35

* Числитель – предельные значения, знаменатель – среднее значение.

Можно предположить, что качественные выводы о затратах на увеличение единицы как прочности, так и других показателей служебных характеристик стали будут в пользу микролегирования бором. Об этом свидетельствуют его расход и стоимость микролегирования, которая меньше, чем при использовании ниобия и ванадия.

Таким образом, микролегирование сталей широкого сортамента борсодержащими сплавами является экономически привлекательным. Об этом свидетельствует и наличие запасов сырья, и новая, более экономичная и экологически чистая технология получения сплава с бором, а также наличие технологии ввода последнего в сталь без изменения процесса плавки.

Современный технологический процесс производства стали, включающий выплавку полупродукта в ДСП и конвертерах с последующей обработкой стали в агрегатах рафинирования металла, получение низкоуглеродистого феррохрома сопровождаются образованием на металлургических предприятиях большого количества твердых промышленных отходов – металлургических шлаков известково-силикатного состава [28].

Особенность этих шлаков заключается в том, что при охлаждении они распадаются в мелкозернистый порошок [29, 30]. Продолжительность распада изменяется от нескольких часов до нескольких суток. Продукты распада относятся к экотоксичным материалам. Они легко аэрируются, распространяются на большие территории, растворяются в осадочных и грунтовых водах.

Одним из направлений стабилизации шлаков [31] от распада является замена аниона SiO_4^{4-} двухкальциевого силиката на анион VO_4^{5-} , присутствие которого в рафинировочных шлаках обеспечивает их высокую жидкоподвижность.

Добавки боратов к шлаку во время или сразу после разделения шлака и металла являются эффективными для стабилизации сталеплавильных шлаков и предотвращения их распада [32].

Распад шлаков нержавеющей стали во время охлаждения можно предотвратить боратной добавкой [33 – 35], которая, предположительно, стабилизирует высокотемпературную полиморфную фазу путем формирования твердого раствора с $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

Экспериментально показано, что наличие в высокоосновных шлаках более 0,34 % V_2O_3 оказывает на них стабилизирующее влияние.

Для оценки эффективности использования V_2O_3 в качестве стабилизатора шлаков низко- и среднеуглеродистого феррохрома от распада была проведена серия промышленных экспериментов с вовлечением в производство в качестве борсодержащего материала колеманита [36]. Расчетное содержание V_2O_3 в шлаке составило соответственно 0,37 – 0,55 %. Отбор проб на химический анализ проводили от застывшего шлака после его извлечения из чаши. Отмечено высокое фактическое содержание V_2O_3 в шлаке с усвоением около 98 %. После охлаждения практически все шлаки оставались в кусковом, не рассыпающимся в порошок виде. Было показано, что V_2O_3 в виде различного борсодержащего сырья является эффективным стабилизатором высокоосновных шлаков ферросплавного и сталеплавильного производства, позволяющим при небольшом расходе устойчиво получать товарный кусковый материал.

Выводы

Рассмотрены пути использования бора и его соединений в процессах подготовки и металлургической пе-

переработки рудных материалов с целью улучшения качества конечной продукции. Разработанные технологии обеспечены борсодержащим сырьем. Теоретическими, лабораторно-экспериментальными и промышленными испытаниями показана возможность за счет этого повысить технико-экономические показатели производства и качество окатышей, агломератов, чугуна, стали, ферросплавов, эффективно утилизировать отвальные шлаки. Выдвинутые и проверенные на металлургических предприятиях технические решения не требуют

капитальных затрат и реализуются присадкой микродоз бора и его соединений в объекты металлургического производства.

Приведенный обзор, результаты лабораторных и промышленных исследований показали, что бор и его соединения применяются на всех переделах черной металлургии, интенсифицируя процессы и улучшая качество металла. Реализация возможности воздействия бора будет позитивно влиять на конечный комплекс свойств металлопродукции и шлака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Жучков В.И., Акбердин А.А., Ватолин Н.А. и др. Применение борсодержащих материалов в металлургии // *Электрометаллургия*. 2011. № 3. С. 25–29.
2. Применение бора и его соединений в металлургии / В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев, А.А. Акбердин, А.А. Бабенко, А.В. Сычев. Новосибирск: Академиздат, 2018. 156 с.
3. 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.
4. Бобкова О.С., Свистунова Т.В. Воздействие бора на свойства расплавов и структурообразование сталей и сплавов на основе железа и никеля // *Металлург*. 2008. № 3. С. 56–60.
5. El-Shennawy M., Farahat A.I., Masoud M.I., Abdel-Aziz A.I. Heat treatment effect on microalloyed low carbon steel with different boron content // *International Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 5. No. 4. P. 9–20.
6. Adamczyk J., Ozgowicz W., Wusatowski R., Kalinowska-Ozgowicz E., Grzyb R. Boron-treated microalloyed quenched and tempered plates, their structure and properties // *Journal of Materials Processing Technology*. 1997. Vol. 64. No. 1–3. P. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02548-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02548-4)
7. Opiela M. The influence of heat treatment on microstructure and crack resistance of boron microalloyed steel plates // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 43. No. 1. P. 117–124.
8. Hu J., Du L.X., Ma Y.N., Sun G. Sh., Xie H., Misra R.D.K. Effect of microalloying with molybdenum and boron on the microstructure and mechanical properties of ultra-low-C Ti bearing steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 640. P. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.087>
9. Balachandran G., Menaka K., Ravichandar D. Influence of manganese and boron alloying and processing conditions on the microstructure and the mechanical properties of 0.4 % carbon steels // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. No. 2. P. 401–409. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1491-9>
10. Opiela M. Effect of boron microaddition on hardenability of new-developed HSLA-type steels // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 99. No. 1/2. P. 13–23.
11. Fujishiro T., Hara T., Terada E., Sakamoto S., Asahi H. Application of B-added low carbon bainite steels to heavy wall X80 UOE line pipe ultralow temperature usage // *Proceedings of the 2010 8th Int. Pipeline Conf.* 2010. Vol. 2. P. 377–382. <https://doi.org/10.1115/IPC2010-31209>
12. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугуне и стали / Под ред. С.М. Винарова. ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1961. 459 с.
13. Naderi M., Ketabchi M., Abbasi M., Bleck W. Analysis of Microstructure and mechanical properties of different hot stamped
1. 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, vol. 2011, no. 12, pp. 1134–1137. <https://doi.org/10.1134/S003602951112024X>
2. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Akberdin A.A., Babenko A.A., Sychev A.V. *Use of Boron and Its Compounds in Metallurgy*. Novosibirsk: Akademizdat, 2018, 156 p. (In Russ).
3. 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, vol. 2010, no. 12, pp. 1148–1150. <https://doi.org/10.1134/S0036029510120165>
4. Bobkova O.S., Svistunova T.V. Impact of boron on melt properties and structurization of iron and nickel-based steels and alloys. *Metalurgist*. 2008, vol. 52, no. 3–4, pp. 175–181. <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9028-9>
5. El-Shennawy M., Farahat A.I., Masoud M.I., Abdel-Aziz A.I. Heat treatment effect on microalloyed low carbon steel with different boron content. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2016, vol. 5, no. 4, pp. 9–20.
6. Adamczyk J., Ozgowicz W., Wusatowski R., Kalinowska-Ozgowicz E., Grzyb R. Boron-treated microalloyed quenched and tempered plates, their structure and properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, vol. 64, no. 1–3, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02548-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02548-4)
7. Opiela M. The influence of heat treatment on microstructure and crack resistance of boron microalloyed steel plates. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2010, vol. 43, no. 1, pp. 117–124.
8. Hu J., Du L.X., Ma Y.N., Sun G. Sh., Xie H., Misra R.D.K. Effect of microalloying with molybdenum and boron on the microstructure and mechanical properties of ultra-low-C Ti bearing steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, vol. 640, pp. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.087>
9. Balachandran G., Menaka K., Ravichandar D. Influence of manganese and boron alloying and processing conditions on the microstructure and the mechanical properties of 0.4 % carbon steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019, vol. 72, no. 2, pp. 401–409. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1491-9>
10. Opiela M. Effect of boron microaddition on hardenability of new-developed HSLA-type steels. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 99, no. 1/2, pp. 13–23.
11. Fujishiro T., Hara T., Terada E., Sakamoto S., Asahi H. Application of B-added low carbon bainite steels to heavy wall X80 UOE line pipe ultralow temperature usage. *Proceedings of the 2010 8th Int. Pipeline Conf.* 2010, vol. 2, pp. 377–382. <https://doi.org/10.1115/IPC2010-31209>
12. *Boron, Calcium, Niobium and Zirconium in Cast Iron and Steel*. Vinarov S.M. ed. STTI of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy, 1961, 459 p. (In Russ.).
13. 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>
14. Asahi H. Development of high grade OCTG and linepipe by utilizing boron addition // *Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ*. 2009. No. 22. P. 639.
 15. 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>
 16. Mejia I., Bedolla-Jacuindea 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>
 17. Голубцов В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. Челябинск, 2006. 421 с.
 18. Потапов А.И. Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства боросодержащей стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 25 с.
 19. Lopez-Chipres E., Mejia L., Maldonado C., Bedolla-Jacuindea A., El-Wahabi M., Cabrera J.M. Hot flow behavior of boron microalloyed steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 480. No. 1–2. P. 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.067>
 20. Stumpf W., Banks K. The hot working characteristics of a boron bearing and a conventional low carbon steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 418. No. 1–2. P. 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.020>
 21. Колбасников Н.Г., Матвеев М.А. Исследование влияния бора на высокотемпературную пластичность микролегированных сталей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. *Металлургия и материаловедение*. 2016. № 1. С. 129–135.
 22. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production // *Metallurgija*. 2019. Vol. 58. No. 3–4. P. 291–294.
 23. Гасик М.И., Гладких В.А., Жданов А.В. и др. Расчетное определение ценности марганцеворудного сырья // *Электрометаллургия*. 2009. № 1. С. 32–34.
 24. Kelamanov B., Samuratov Y., Akuov A., Abdirashit A., Burumbayev A., Orynassar R. Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment // *Metallurgija*. 2021. Vol. 60. No. 3–4. P. 313–316.
 25. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007. № 5. С. 13–16.
 26. Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И. и др. Физико-химические характеристики, получение и применение комплексных боросодержащих ферросплавов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 5. С. 348–364. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-348-354>
 27. Сиротин Д.В. Эффективность повышения качества стали за счет микролегирования // Препринт. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. 50 с.
 28. 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. P. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02147.x>
 29. Заякин О.В., Статных Р.Н., Жучков В.И. Изучение возможности получения неразлагающегося шлака при производстве низкоуглеродистого феррохрома // *Металлург*. 2018. № 9. С. 25–29.
 30. 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>
 - B-bearing steels. *Steel Research International*. 2010, vol. 81, no. 3, pp. 216–223. <https://doi.org/10.1002/srin.200900125>
 14. Asahi H. Development of high grade OCTG and linepipe by utilizing boron addition. *Dzairo to Prosesu CAMP ISIJ*. 2009, no. 22, p. 639.
 15. 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>
 16. Mejia I., Bedolla-Jacuindea 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>
 17. Golubtsov V.A. *Theory and Practice of Introducing Additives into Steel outside the Furnace*. Chelyabinsk, 2006, 421 p. (In Russ.).
 18. Potapov A.I. *Research of steel microalloying with boron in order to improve the technology of boron-containing steel production: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Moscow, 2013, 25 p. (In Russ.).
 19. Lopez-Chipres E., Mejia L., Maldonado C., Bedolla-Jacuindea A., El-Wahabi M., Cabrera J.M. Hot flow behavior of boron microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 480, no. 1–2, pp. 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.067>
 20. Stumpf W., Banks K. The hot working characteristics of a boron bearing and a conventional low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 418, no. 1–2, pp. 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.020>
 21. Kolbasnikov N.G., Matveev M.A. Effect of boron on high-temperature plasticity of microalloyed steels. *Nauchno-tehnicheskie ведомosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Metallurgiya i materialovedenie*. 2016, no. 1, pp. 129–135. (In Russ.).
 22. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production. *Metallurgija*. 2019, vol. 58, no. 3–4, pp. 291–294.
 23. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Ovcharuk A.N. Calculation of the value of manganese ore raw materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009, vol. 2009, no. 8, pp. 756–758.
 24. Kelamanov B., Samuratov Y., Akuov A., Abdirashit A., Burumbayev A., Orynassar R. Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment. *Metallurgija*. 2021, vol. 60, no. 3–4, pp. 313–316.
 25. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-bearing ferroalloys in steel. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 5, pp. 416–418. <https://doi.org/10.3103/S0967091207050038>
 26. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Sychev A.V., Kel' I.N. Physicochemical characteristics, production and application of boron-bearing complex ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 348–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-348-354>
 27. Sirotnin D.V. *Efficiency of Improving the Quality of Steel by Microalloying*. Preprint. Yekaterinburg: Institute of Economics, UB RAS, 2013, 50 p. (In Russ.).
 28. 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>
 29. 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>
 30. 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>

31. Pontikes Y., Kriskova L., Wang X., Geysen D. Additions of industrial residues for hot stage engineering of stainless steel slags // 2nd Int. Slag Valorisation Symposium on April 18-20, 2011, Belgium. 2011. P. 313–326.
32. Fletcher J.G., Glasser F.P. Phase relations in the system CaO–B₂O₃–SiO₂ // Journal of Materials Science. 1993. Vol. 28. No. 10. P. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
33. Seci A., Aso Y., Okubo M., Sudo F., Ishizaka K. Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag // Kawasaki Steel Technical Report. 1986. No. 15. P. 16–21.
34. 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>
35. Chan C.J., Waltraud M., Young J.F. Physical stabilization of the β–γ transformation in dicalcium silicate // Journal of the American Ceramic Society. 1992. Vol. 75. No. 6. P. 1621–1627. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04234.x>
36. Zayakin O.V., Kel' I.N. Promising directions for the stabilization of ferroalloy production slags // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 401–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.401>
31. Pontikes Y., Kriskova L., Wang X., Geysen D. Additions of industrial residues for hot stage engineering of stainless steel slags. In: 2nd Int. Slag Valorisation Symposium on April 18-20, 2011, Belgium. 2011, pp. 313–326.
32. Fletcher J.G., Glasser F.P. Phase relations in the system CaO–B₂O₃–SiO₂. Journal of Materials Science. 1993, vol. 28, no. 10, pp. 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/BF00356203>
33. Seci A., Aso Y., Okubo M., Sudo F., Ishizaka K. Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slag. Kawasaki Steel Technical Report. 1986, no. 15, pp. 16–21.
34. 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>
35. Chan C.J., Waltraud M., Young J.F. Physical stabilization of the β–γ transformation in dicalcium silicate. Journal of the American Ceramic Society. 1992, vol. 75, no. 6, pp. 1621–1627. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04234.x>
36. Zayakin O.V., Kel' I.N. Promising directions for the stabilization of ferroalloy production slags. Materials Science Forum. 2019, vol. 946, pp. 401–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.401>

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

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

E-mail: zferro@mail.ru

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

E-mail: akberdin_38@mail.ru

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

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

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

E-mail: akberdin_38@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2021

После доработки 16.07.2021

Принята к публикации 08.08.2021

Received 09.06.2021

Revised 16.07.2021

Accepted 08.08.2021