

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Обзорная статья
УДК 669.01, 669.046.52
DOI: 10.14529/met250101

О РОЛИ БОРСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Н.В. Немчинова¹, ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

С.В. Баликов², balikov@irgiredmet.ru

А.А. Ильин³, worldilyins@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

А.Д. Гапошин¹, gaposhin2001@gmail.com

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

² АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия

³ Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан

Аннотация. Цель – структурировать информацию о применении бора и его соединений в металлургических процессах. Проведен анализ данных о роли борсодержащих материалов (чистого борного ангидрида, колеманита, отходов от производства борсодержащего стекла, тетрабората натрия) в различных процессах по получению металлов на основе обзора отечественной и зарубежной научной литературы. Проведен анализ широкого спектра информации о применении борного ангидрида в черной металлургии: подготовке окускованной шихты для доменной плавки, выплавке чугуна, стали, различных ферросплавов, технического кремния. Показано, что довольно богатый опыт в применении боратовых флюсов в технологических процессах черной металлургии приобретен, в частности, исследователями Института металлургии УрО РАН (Россия) и Химико-металлургическом института им. Ж. Абишева (Республика Казахстан). Показано, что при всем разнообразии направлений применения борсодержащих материалов неизменным остается главное: положительный технологический эффект, основанный на способности борсодержащих флюсов снижать температуру плавления оксидных систем и повышать жидкоподвижность шлаков, образующихся в различных пирометаллургических процессах. Использование бора в таких процессах повышает их эффективность, что отвечает стратегии развития черной и цветной металлургии России на период 2014–2022 годы и на перспективу до 2030 года.

Ключевые слова: черная и цветная металлургия, борсодержащие материалы, флюсы, шлаковые системы

Для цитирования: О роли борсодержащих материалов в металлургических процессах / Н.В. Немчинова, С.В. Баликов, А.А. Ильин, А.Д. Гапошин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 1. С. 5–21. DOI: 10.14529/met250101

ON THE ROLE OF BORON-CONTAINING MATERIALS IN METALLURGICAL PROCESSES

N.V. Nemchinova¹, ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

S.V. Balikov², balikov@irgiredmet.ru

A.A. Ilin³, worldilyins@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

A.D. Gaposhin¹, gaposhin2001@gmail.com

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia

³ Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan

Abstract. The objective is to structure information on the use of boron and its compounds in metallurgical processes. The analysis of data on the role of boron-containing materials (pure boric anhydride, colemanite, waste from the production of boron-containing glass, sodium tetraborate) in various processes for obtaining metals is carried out based on a review of domestic and foreign scientific literature. A wide range of information on the use of boric anhydride in ferrous metallurgy is analyzed: preparation of agglomerated charge for blast furnace smelting, smelting of cast iron, steel, various ferroalloys, technical silicon. It is shown that quite a wealth of experience in the use of borate fluxes in technological processes of ferrous metallurgy has been acquired, in particular, by researchers from the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia) and the Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Republic of Kazakhstan). It is shown that with all the diversity of applications of boron-containing materials, the main thing remains unchanged: a positive technological effect based on the ability of boron-containing fluxes to reduce the melting point of oxide systems and increase the fluidity of slags formed in various pyrometallurgical processes. The use of boron in such processes increases their efficiency, which corresponds to the development strategy of ferrous and non-ferrous metallurgy in Russia for the period 2014–2022 and for the future up to 2030.

Keywords: ferrous and non-ferrous metallurgy, boron-containing materials, fluxes, slag systems

For citation: Nemchinova N.V., Balikov S.V., Ilin A.A., Gaposhin A.D. On the role of boron-containing materials in metallurgical processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2025;25(1):5–21. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250101

Введение

Металлургическая промышленность занимает лидирующие позиции в российской экономике, являясь конкурентоспособной на мировом рынке благодаря обеспеченности сырьевой базой черных и цветных металлов, применению эффективных технологий с получением высококачественной металлсодержащей продукции [1, 2]. Одной из основных стратегических целей развития черной и цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года является ресурсо- и энергосбережение [3].

Роль бора в современной металлургии значительна, несмотря на то, что его применяют не столь активно. В процессах черной металлургии в элементном виде он вводится в сталь и различные сплавы для улучшения их свойств (например, как это описано в работах [4–8]). В работах [9, 10] авторы обобщили и

достаточно полно осветили преимущества и широкое применение бора для микролегирования стали, чугунов всех классов, различных сплавов. Такое применение бора обусловлено относительной дешевизной и доступностью, безопасностью применения и экологичностью.

В черной металлургии исследователями широко изучено и продолжает активно изучаться вопрос о влиянии бора на характеристики процессов всех стадий металлургического передела: агломерации, окатывания, процессов выплавки чугуна и различных ферросплавов, производства стали [9].

Значительное число работ в данном направлении выполнено учеными Химико-металлургического института им. Ж. Абишева и Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Республика Казахстан), Института металлургии Уральского отделения РАН, Уральского фе-

дерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина и Уральского института металлов (г. Екатеринбург, Россия), Карагандинского индустриального университета (г. Темиртау, Республика Казахстан) и др.

При производстве драгоценных металлов бура (соль тетраборной кислоты) используется в качестве флюсовой добавки при плавке катодных осадков с получением сплава золота лигатурного (сплава Доре), плавке различных золотосодержащих материалов и промежуточных продуктов в разнообразных комбинированных схемах переработки руд, содержащих золото и серебро, пробирном анализе для определения содержания драгоценных металлов [11–14].

В данной статье проведен обзор применения борсодержащих соединений в различных металлургических процессах.

Борсодержащие руды и минералы

Среднее содержание бора в земной коре составляет 4 г/т. В настоящее время известно

более 160 минералов бора, список их пополняется (открываются новые минералы). Мировые запасы бора в рудах (твердом сырье) составляют ~ 1 млрд т (в пересчете на B_2O_3) [15]. Однако промышленное значение имеют 10–15 минералов, в основном это борсиликаты кальция и бораты щелочных и щелочноземельных металлов [15], табл. 1 [16].

Наиболее ценные минералы имеют вулканическое происхождение, залегают в засушливой местности, содержат до 40–50 % оксида бора и зачастую не требуют обогащения. 90 % добычи приходится на четыре из них: колеманит, кернит, буру и улексит.

По данным U. S. Geological Survey за 2022 г. (https://dzen.ru/a/ZSMGw4C_Zjp_R2Q9), лидером по добыче борсодержащих руд является Турция (1,7 млн т очищенных боратов, ~ 70 % извлекаемых минералов составляет колеманит). Далее следуют: Китай (300 тыс. т в пересчете на оксид бора), Чили (300 тыс. т улексита), Перу (250 тыс. т боратов), Боливия

Таблица 1
Основные минералы бора, встречающиеся в его промышленных месторождениях

Table 1

The main boron minerals found in its industrial deposits

Группа	Минерал	Формула	Содержание B_2O_3 , % масс.
Натровые бораты	Борная кислота (сассолин)	H_3BO_3	56,4
	Бура (тинкал)	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	36,5
	Тинкаконит	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	47,8
	Кернит	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	51,0
Натрово-кальциевые бораты	Улексит	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	43,0
	Проберит	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	49,6
Кальциевые бораты	Иньоит	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 13H_2O$	37,6
	Колеманит	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	50,8
	Пандермит	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	49,8
Кальциево-(калиево)-магниевые бораты	Курчатовит	$Ca_6Mg_5MnB_{12}O_{30}$	40,7
	Сахаит	$Ca_{12}Mg_4(CO_3)_4(BO_3)_7Cl(OH)_2 \cdot H_2O$	18,5
	Калиборит	$KMg_2[B_3O_3(OH)_5]_2B_5O_6(OH)_4 \cdot 2H_2O$	57,0
	Гидроборацит	$CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	50,6
Магниевые бораты	Борацит	$Mg_3B_7O_{13}C$	62,2
	Ашарит (ссайбелиит)	$Mg_2B_2O_5 \cdot H_2O$	41,4
	Котоит	$Mg_3(BO_3)_2$	35,5
	Суанит	$Mg_2B_2O_5$	46,3
	Преображенскит	$Mg_8[B_5O_7(OH)_4]_2 \cdot H_2O$	51,2
	Людвижит	$(Mg,Fe)_2Fe(BO_3)O_2$	12–17
Боросиликаты	Датолит	$Ca_2B_2(SiO_4)_2(OH)_8$	21,8
	Данбурит	$CaB_2(SiO_4)_3$	28,3
Боралюмо-силикаты	Аксинит	$Ca_2(Mg,Fe)Al_2BSiO_4O_{15}(OH)$	5–8
	Турмалин	$(Na,Ca)(MgAl)_6[B_3Al_3Si_6(O,OH)_3O]$	7–12

(200 тыс. т улексита), Аргентина (130 тыс. т руды) и Россия (80 тыс. т датолита). Республика Казахстан также обладает значительными запасами борсодержащих руд.

Среднее содержание оксида бора в главной массе руд стран дальнего зарубежья достаточно высокое – до 25–40 %. В России и странах СНГ борные руды имеют более низкое качество – содержание B_2O_3 в них колеблется в среднем от 3 до 12–15 % [16].

Разведанные месторождения бора в Турции составляют 73 % мировых запасов бора. Месторождения боратовых руд в Турции: Эскишехир-Кырка, Кютахья-Эмет, Балыкесир-Бандырма и Бигадич. Наиболее распространенными минералами бора в турецких рудах с точки зрения запасов являются тинкал и колеманит. В Турции запасы тинкала расположены в Эскишехире-Кырка, запасы колеманита – в Кютахье-Эмете, Балыкесире-Бигадиче и Бурсе-Кестелеке. Кроме того, запасы улексита находятся в Балыкесир-Бигадич, а улексит время от времени добывается в качестве побочного продукта в Бурсе-Кестелеке. Колеманитовые руды с содержанием $\sim 30\%$ B_2O_3 , добываемые в Турции, подвергаются промывке и сортировке с получением концентрата с содержанием уже 43–45 % B_2O_3 [17–19].

В соответствии с Законом Турции № 2840, задачу по производству, эксплуатации и маркетингу бора и продуктов из бора в Турции выполняет компания Eti Maden («Эти Маден»). На предприятиях 4 производственных дирекций под руководством данной компании производятся в основном пентагидрат буры, декагидрат буры, борная кислота, этидот-67, оксид бора, борат цинка, кальцин тинкал, безводная бура, молотый колеманит и молотый улексит. Продукты поставляются на внутренний и международный рынки. Общая производственная мощность Eti Maden по производству очищенного бора в 2017 г., напри-

мер, составило $\sim 2,7$ млн т. Дочерняя компания АВ Etiproducts OY (Финляндия), основанная в 1982 г., распространяет продукцию Eti Maden в Скандинавии, Восточной Европе (Эстонии, Латвии, Литве), России, Центральной Азии и Африке.

В Химико-металлургическом институте имени Ж. Абишева был проведен химический анализ борсодержащих минералов турецкого происхождения, предоставленных АВ Etiproducts OY (табл. 2 [20]). Как показали проведенные исследования, руды Турции – богаты по содержанию оксида бора, что выгодно отличает их от других известных минеральных источников бора.

Крупнейшее скопление боратовых руд в Республике Казахстан – Индерское месторождение, расположенное в Индерском районе Атырауской области [21]. Отрабатываются рудные тела, расположенные ниже уровня грунтовых вод, на глубине 8–18 м. Руда данного месторождения содержит улексит, ашарит, гидроборцит, а также небольшое количество пандермита, колеманита, индерита, иньюита, курнаковита, индерборита. Примесями являются гипс, глина и небольшие количества карбонатов. Содержание оксида бора в руде данного месторождения существенно ниже, чем в турецких рудах. Освоение казахстанского месторождения в 1960-х гг начиналось с селективной добычи руд с содержанием B_2O_3 15–17 %. В настоящее время руда содержит 8–13 % оксида бора. Низкая востребованность такого продукта негативно сказалась на его себестоимости.

Россия не располагает богатыми по бору залежами. Бор в рудах российских месторождений представлен в форме борсиликатных минералов и железо-магниевого боратов с содержанием B_2O_3 от 21,8 % (в датолите) до 5–7 % (в людвигите, суаните, аксините, курчатовите и др.). Эти минералы трудно вскры-

Химический состав борсодержащих материалов [20]

Таблица 2

Chemical composition of boron-containing materials [20]

Table 2

Материал	Содержание, % масс.							$t_{н.кр.}, ^\circ C$
	B_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	ппп*	
Тинкал (бура)	43,82	5,4	5,85	3,63	–	14,3	24,5	863
Колеманит	38,78	27,9	3,6	5,63	0,69	–	23,37	1004
Улексит	35,98	18,9	4,95	4,95	0,23	5,52	33,62	940

*ппп – потери при прокаливании;

** $t_{н.кр.}$ – температура начала кристаллизации.

ваются, а ввиду низкого их содержания в сырье требуется глубокое обогащение руды перед химической переработкой. Предложены комбинированные схемы обогащения, включающие нейтронно-абсорбционную сепарацию, гравитационные методы и флотацию [22]. Промышленной переработке в России подвергаются лишь датолитовые руды Дальнегорского месторождения в Приморском крае [15]. При их переработке с последующим сернокислотным выщелачиванием датолитового концентрата образуется отход производства борной кислоты – борогипс, который автор диссертации [23] предложил обогащать методом флотации с применением реагента-собирателя – олеилсаркозината натрия.

Борные руды других месторождений России (Таёжное, Солонго, Титовское в Бурятии и Якутии) не обрабатываются главным образом из-за низкого качества руды и борных минералов и технологической недоизученности. Перспектива освоения этих месторождений, имеющих крупные запасы, весьма отдаленна и неясна [24].

Основным компонентом боратовых руд является оксид бора. B_2O_3 – диэлектрическое бесцветное кристаллическое вещество, легко переходящее в стеклообразное состояние. Имеет низкую температуру плавления (450–470 °С); поверхностное натяжение составляет 95 МН/м (против 310, 307, 314 и 690 МН/м соответственно для CaO , SiO_2 , MgO и Al_2O_3). B_2O_3 обладает способностью стекловаться, содержащие его силикатные расплавы имеют малую вязкость. Также он способен, как указывают авторы в [9], предотвращать силикатный распад высокоосновных агломератов, окатышей, шлаков; при переходе в оптимальных количествах в металл (например, в сталь) придавать ему высокие эксплуатационные характеристики. А применение B_2O_3 в доменной плавке обусловлено необходимостью повышения десульфурующей способности шлаков за счет снижения их вязкости.

Роль борного ангидрида как компонента шлаковых систем

Большинство борсодержащих фаз являются легкоплавкими. Так, с гематитом борный ангидрид образует два низкотемпературных конгруэнтно плавящихся соединения: $Fe_2O_3 \cdot B_2O_3$ (1125 °С) и $Fe_2O_3 \cdot 3B_2O_3$ (1280 °С). В бинарной системе Fe_2O_3 – B_2O_3 имеются также две низкотемпературные эвтектики, пла-

вающиеся соответственно при температурах 975 и 1165 °С. 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 при более низкой температуре 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, добавка в шихту B_2O_3 изменяет направление фазообразования в их связке в сторону появления более устойчивых и прочных фаз, а также ускоряет формирование конечной структуры шихтовых окускованных материалов за счет более интенсивной ассимиляции составляющих шихты легкоплавким и хорошо подвижным боратовым расплавом [9].

Авторами [25] показано положительное влияние добавки борного ангидрида на снижение вязкости шлаков системы CaO – SiO_2 – Al_2O_3 . Для снижения температуры плавления и вязкости шлаков при производстве стали активно используют добавку фтористого кальция (плавикового шпата); B_2O_3 , как и CaF_2 , обладает высокой разжижающей способностью, но в отличие от плавикового шпата не загрязняет атмосферу цеха вредными фторсодержащими газообразными выбросами.

Получение железорудных окатышей

В технологии окускования железорудного сырья и выплавке передельного чугуна широкое распространение получили магнийсодержащие добавки. Применение же борсодержащих добавок для этих целей обусловлено предположением того, что они обеспечат снижение температуры плавления железорудного концентрата, что приведет к упрочнению окатышей (брикетов, агломерата). В случае же добавки в шихту агломерации оксида бора содержание C_2S снижается (ввиду уменьшения в целом содержания CaO за счет взаимодействия оксидов кальция и бора между собой). При этом за счет новых образующихся боратов количество стекла возрастает, C_2S стабилизируется борным ангидридом в β -форме, и поэтому агломерат выдерживает длительное хранение без заметных признаков разрушения [9].

Авторами [26] было проведено изучение технологических аспектов производства бор-

содержащих окатышей и разработана технология введения бора в качканарское ванадий-содержащее сырье с целью исключения из доменной шихты агломерата, не содержащего ванадий. Авторами даны рекомендации по оптимизации шлакового режима, сокращению потерь металла со шлаком и проведению опытных плавов окатышей с оптимальными добавками боратовой руды и бентонита в доменных печах.

В работе [9] авторы установили, что присутствие B_2O_3 в количестве 0,20–0,35 % в окискованной железосодержащей шихте увеличивает прочность окатышей при восстановлении, оцениваемую по выходу фракции класса > 10 мм. Если данный показатель для обычных окатышей составляет 14–20 %, то для борсодержащих – 39,5–91,4 %. Проведенные в промышленных условиях испытания агломерата с добавкой 0,44 % B_2O_3 показали, 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 %).

Как указывали авторы в работе [27], при обжиге железорудных окатышей для доменной плавки на машинах конвейерного типа их нижние слои имеют малую прочность из-за недостатка тепла. Поэтому авторы предложили снизить температуру обжига, при которой завершаются процессы формирования итоговой структуры окатышей, путем ввода легкоплавких борсодержащих флюсов. В ходе проведенных экспериментов было показано, что окатыши с содержанием 0,12–0,25 % B_2O_3 имеют одинаковую прочность по всей высоте слоя [27]. Согласно результатам промышленных испытаний на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате (ССГОК) (в настоящее время это АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», г. Рудный Костанайской обл. Республики Казахстан, входящее в состав Eurasian Resources Group), с наработкой 500 тыс. т борсодержащих окатышей прочность окатышей на сжатие увеличилась, расход известняка был снижен на 12 %, а бентонита – в 2 раза.

Загрузка в доменные печи ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск Челябинской обл.) произведенных на ССГОК 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 ее содержания в чугуне до 0,005 %. Высокая прочность окатышей как на сжатие, так и при восстановлении, а также хорошая жидкоподвижность шлака, содержащего в среднем 0,25 % борного ангидрида, позволили форсировать работу печи. Интенсивность плавки по руде возросла на 17,4 %, удельный расход кокса снизился на 14 кг/т чугуна, средняя концентрация бора в чугуне составила 0,007 % [28].

Аглодомненное производство

Производимый в настоящее время агломерат для доменной плавки, содержащий железосодержащие сырьевые материалы, с высокой основностью обладает низкой прочностью [29]. По мнению большинства исследователей, причиной низкой прочности офлюсованных агломератов является наличие в их структуре двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S), который изменяет свой объем на 10–12 % (при полиморфном превращении), что при охлаждении и приводит к разрушению агломерата.

Согласно изобретению авторов [30], при введении B_2O_3 в шихту агломерации железорудного сырья образуются низкотемпературные соединения, что позволяет вести процесс спекания с низким расходом топлива. Авторы указывают, что при увеличении содержания B_2O_3 в получаемом агломерате свыше 0,1 % при одновременном уменьшении содержания в нем MgO , начиная с 3,0 %, можно получить повышение прочности агломерата на 3–5 % и увеличение восстановимости на 5–7 % (это происходит за счет улучшения условий кристаллизации расплавов при спекании [30]).

Для увеличения прочностных свойств агломерата на Лебяжинской аглофабрике (г. Нижний Тагил Свердловской обл.) были проведены промышленные испытания по изучению воздействия легкоплавкой добавки боратовой руды в железорудную шихту с целью стабилизации полиморфного превращения C_2S . В результате содержание мелочи (фракции 0–5 мм) в опытной партии массой 10 тыс. т снизилось в 1,5 раза, а экономия коксика составила 5,1 % [15].

Применение B_2O_3 в доменной плавке также обусловлено необходимостью повышения десульфуризирующей способности шлаков за счет снижения их вязкости. Его применение способствует снижению содержания S в чугуне.

Установлено, что по эффекту влияния на тугоплавкость и вязкость шлаков B_2O_3 не уступает CaF_2 и заметно превосходит MgO : в отличие от них при восстановительной плавке бор переходит в металл, легируя его [31].

Автором [32] разработана технология использования борсодержащих добавок при проплавке титаномагнетитов с применением боратовой руды Индерского месторождения. Были проведены лабораторные исследования по агломерации шихты Качканарского ГОКа с добавкой боратого флюса. Установлено, что при введении боратого флюса в шихту повышается прочность агломерата, но на 0,3–0,5 % снижается содержание железа в агломерате. В ходе проведения агломерации определено, что от 10 до 15 % оксида бора улетучивается [33].

Автор [33] также исследовал влияние ввода борсодержащего агломерата в шихту доменной плавки титаномагнетитов на обычной шихте Лебяжинской фабрики, которое показало эффективность такой добавки для совершенствования шлакового режима при плавке сырья с повышенным содержанием титана. При добавке 3–5 % боратого флюса к обычной шихте Лебяжинской аглофабрики ~ 25 % бора улетучивалось с технологическими газами, в агломерате снизилась массовая доля железа на ~ 0,4 %, производительность установки не изменилась, прочностные характеристики агломерата незначительно улучшились, расход твердого топлива снизился на 3–4 кг/т агломерата. Промышленные испытания показали эффективность применения борсодержащих добавок в доменной плавке титаномагнетитов.

Автором [32] также проведены лабораторные исследования по вовлечению отходов от производства борсодержащего стекла (с содержанием 10,5 % масс. B_2O_3) ПО «Стекловолокно» (г. Полоцк) в агломерационную шихту Качканарского ГОКа. Исследование проводилось при добавках стекла в шихту 0,5 и 1,0 %, что обеспечивает в шлаке требуемое соотношение B_2O_3 и TiO_2 . Показано, что при добавке к титаномагнетитовой агломерационной шихте отходов алюмоборосиликатного волокна в количестве до 1 % повышается эффективность сквозной переработки при одновременном улучшении качества продуктов и снижаются суммарные энергозатраты на 200 кДж/т чугуна.

Авторы в исследовании [9] также указывали, что имеется опыт работы доменных пе-

чей уральских заводов с использованием борсодержащих шлаков. Так, 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 содержание B_2O_3 в шлаке составляло 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 целевой продукт, а снижение работы адгезии вызвало уменьшение потерь чугуна со шлаком на 30 % (отн.) [9].

Сталеплавильное производство

Как известно, одной из важных задач при производстве стали является ее десульфурация, и для достижения эффективности данного процесса важную роль играют физические свойства шлаков – вязкость и температура плавления. От этих свойств зависят возможные пределы применения шлаков. И, как указывают авторы в своем исследовании [34], борсодержащие флюсы расширяют эти возможности вследствие увеличения интервала гомогенно-жидкого состояния высокоосновных известково-глиноземистых оксидных систем. Пробы металла и шлака для исследований отобраны из установки ковш-печь АО «АрселорМиттал Темиртау» (г. Темиртау Карагандинской обл., Республика Казахстан), в качестве борсодержащего материала использовали турецкий колеманит с 45 % B_2O_3 , который задавали в ковш-печь вместе с известью. Авторами определены температура плавления изученных промышленных шлаков (1370–1430 °С) и их вязкость (при 1550–1600 °С – на уровне 0,06–0,13 Па·с), т. е. по физическим свойствам они оптимальны для ковшевой обработки стали. Также получена достаточно высокая степень десульфурации стали (до 75 %), что говорит о перспективности использования на установке ковш-печь высокоосновных борсодержащих шлаков (при одновременном соблюдении разработанных рекомендаций по формированию заданного состава флюса, окисленности металла и шлака) [34].

Авторы инновационного патента [35] предложили смесь для обработки стали в ковше, где в качестве флюсующего материала (вместо плавикового шпата) рекомендова-

ли использовать колеманит с содержанием 30–45 % B_2O_3 и не более 0,2 % S и магнезиальный флюс (дополнительно) при следующем соотношении компонентов, % масс.: колеманит – 4–10, алюминий – 5–20, магнезиальный флюс – 6–30, известь – остальное. MgO и CaO, содержащиеся в магнезиальном флюсе, обеспечивают формирование в ковше высокоосновных рафинировочных шлаков в области насыщения MgO (с содержанием 2–5 % масс. B_2O_3), обладающих низким агрессивным воздействием на переклазоуглеродистую футеровку ковшей. Кроме этого, распределение бора между шлаком и металлом обеспечивает улучшение качества стали за счет микролегирования ее бором (в количестве 0,002–0,005 % масс.).

Автор диссертационного исследования [36] при выплавке стали на стадии аргонокислородного рафинирования в качестве флюса для повышения жидкоподвижности и снижения вязкости шлака [37] рекомендует применять боратовую руду (вместо плавикового шпата). Замена плавикового шпата присадками оксида бора в процессе формирования шлаков производства нержавеющей стали обеспечивает не только сохранение высокой жидкоподвижности шлаков на протяжении всего восстановительного периода плавки, но и снижение экологической нагрузки на окружающую среду в связи с устранением выбросов фтора в атмосферу, как и указано в [37].

Авторы [38] разработали состав экологически чистых бесфтористых ковшевых шлаков (обладающих низкой вязкостью и обеспечивающих глубокую десульфурацию металла с одновременным прямым микролегированием стали бором и низким агрессивным воздействием на огнеупоры) и предложили технологические приемы их формирования на установке ковш-печь. Рекомендованный состав: основность 3,0–4,0 с содержанием, %: 1–4 B_2O_3 , 15 Al_2O_3 и 8 MgO. Внедрение разработанной технологии формирования данных ковшевых шлаков обеспечило производство экономно легированных низкоуглеродистых конструкционных борсодержащих сталей с низким содержанием серы, в том числе для производства труб большого диаметра с высокими прочностными свойствами [38].

Ферросплавное производство

В ферросплавном производстве борсодержащие материалы используются как для

улучшения шлакового режима плавки, так и для получения специальных видов борсодержащих ферросплавов. Добавка данных ферросплавов при раскислении стали обеспечивает также ее микролегирование бором, что существенно улучшает качество готового продукта. В России и за рубежом для этих целей применяется в основном ферробор с 6–24 % бора [39].

В работе [40] автор усовершенствовал технологию получения внепечным силикотермическим и алюмини-силикотермическим методами комплексных борсодержащих ферросплавов и провел их апробацию при легировании стали. Автором показано, что 0,37–0,55 % B_2O_3 эффективно стабилизирует высокоосновные шлаки сталеплавильного и ферросплавного производств, позволяя устойчиво получать товарный кусковый материал. Преимущество данной схемы обусловлено возможностью получения борсодержащего сплава попутно при выплавке ферросилиция. Экспериментально показано, что комплексный силикотермический ферросиликобор, содержащий 0,6–2,0 % масс. бора и 60–80 % масс. кремния, имеет более высокие служебные характеристики, чем традиционный ферробор. Экспериментально автором также показано, что способность получения жидкоподвижного шлака за счет ввода в него B_2O_3 может быть успешно использована для формирования высокомагнезиальных шлаков, позволяющих значительно снизить износ магнезитовой футеровки [40].

В статье [41] авторы привели результаты расчетно-теоретического обоснования печной технологии борсодержащего алюмокремниевое ферросплава. Проведенные лабораторные испытания по получению комплексных борсодержащих сплавов в печи Таммана и индукционной печи подтвердили возможность производства данного сплава на практике. Внедрение предлагаемой технологии позволит производить высокоэффективный ферросплав для повышения качества стали и чугуна, способствуя тем самым прекращению импорта дорогостоящего ферробора.

Авторами в работе [42] выполнено полное термодинамическое моделирование способа получения сплава на основе изучения химизма процесса и динамики изменения фазового и элементного составов продуктов плавки в диапазоне температур 227–2727 °С, которое показало, что борсодержащий металл

формируется вследствие образования фазы AlB_{12} , а процесс необходимо вести при температуре не менее $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ для формирования окончательного состава ферросплава. Превышение ее нежелательно из-за перехода компонентов шихты в газовую фазу. В качестве источника бора предложено применять индерские боратовые руды Атырауской области и турецкий колеманит. Проведены крупнолабораторные испытания в руднотермической печи мощностью $200\text{ кВ}\cdot\text{А}$ по получению комплексных борсодержащих алюмокремниевых сплавов, востребованных в производстве стали и чугуна.

Автор [43] предложил технологию электротермического получения ферросплавов с использованием боратовых руд. Изучена диаграмма состояния $CaO-SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$. При вводе в производственные шлаки чистого борного ангидрида и боратовой руды Индерского месторождения (с содержанием $15,2\%$ B_2O_3) в них появляются легкоплавкие бораты кальция, что изменяет вязкость шлаков и облегчает выпуск продуктов плавки из печи. Автором проведены промышленные испытания технологии производства ферросилиция марок ФС45, ФС50, ФС65 и ФС75 на Аксуском заводе ферросплавов (ныне – филиале АО «Транснациональная компания «Казхром», входящем в состав Евразийской Группы, г. Аксу Павлодарской обл.) [44]. Кроме улучшения выпуска расплава ферросилиция из печи при отработке технологии выплавки Ф65 на печи мощностью $63\text{ МВ}\cdot\text{А}$ (в течение 40 сут) было достигнуто повышение производительности печи на $4,5\%$, снижение расхода электроэнергии на 1% , а также снижение расходных коэффициентов сырьевых материалов (кварцита, железной стружки, топлива) [43].

Авторы [45] представили результаты своих исследований по изучению кинетики взаимодействия карбида кремния с печным шлаком производства ферросилиция. Установлено, что в условиях производства ферросилиция в руднотермической печи реакция разрушения карбида кремния кремнеземом протекает в диффузионной области. Показано, что присадка в шлаки производства ферросилиция борного ангидрида способствует ускорению процесса разрушения карбида кремния. При температуре $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличение в шлаке содержания B_2O_3 от 0 до 4% способствует росту константы скорости с $5,2\cdot 10^{-2}$ до $10,0\cdot 10^{-2}$, т. е. практически вдвое.

Согласно изобретению [46], при дополнительном вводе B_2O_3 в шихту для производства феррохрома в количестве, обеспечивающем отношение B_2O_3 к магнезиальному модулю MgO/Al_2O_3 в пределах $0,1-0,3$, снижаются содержание Cr в шлаке (на $2,35\%$) и расход электроэнергии (на $150\text{ кВт}\cdot\text{ч}$), а также увеличивается содержание Cr в сплаве (на $1,6\%$).

В другом изобретении [47] авторы предлагают для снижения температур образования жидкой фазы и полного плавления рудно-известковой части шихты при выплавке рафинированного феррохрома с получением шлака, содержащего после остывания стабилизированные высокотемпературные формы C_2S , добавлять в шихту B_2O_3 в количестве $0,25-0,45\%$ (от массы CaO в шихте). Причем оксид бора необходимо вводить одновременно с загрузкой рудно-известковой части шихты. В патенте же [48] авторы предлагают новый способ подачи B_2O_3 при выплавке рафинированного феррохрома: вводить в печь в шлаковый расплав за $10-20$ мин до выпуска продуктов плавки в количестве $0,2-0,3\%$ от массы шлакового расплава.

Согласно изобретению [49], можно достигнуть увеличения на 4% извлечения Mn в сплав (при выплавке силикомарганца) и производительности печи на $3-4\%$ при использовании в качестве флюса борсодержащего материала в количестве, обеспечивающем содержание бора в шихте $2-3\%$ от массы марганецсодержащего материала.

В статье [50] авторы указывают, что в результате проведенных лабораторных испытаний при использовании боратовых флюсов решился вопрос снижения вязкости высокоосновных шлаков (за счет воздействия на их физико-химические свойства). Повышение основности шлаков ферромарганцевого производства благоприятно влияет на восстановление Mn в металл и снижение содержания кремния в нем. Авторы апробировали разработанную технологию в полупромышленном масштабе с выплавкой высокоуглеродистого ферромарганца флюсовым способом из марганцевой руды месторождения «Богач»: наилучшие показатели были достигнуты при $CaO/SiO_2 = 1,8$ и содержании B_2O_3 в шлаке $0,8\%$.

В работе [51] авторы описывают проблемы при выплавке силикохрома, возникающие из-за вовлечения в производство высокомагнезиальных тугоплавких хромитовых руд.

Шлаки силикохрома высоких марок (с содержанием Si 48–50 %) характеризуются высокими вязкостью и температурой плавления. Необходимость поддержания высокого нагрева способствует повышенному улету кремнезема, магнезия, что приводит в итоге к забиванию подсводового пространства печи возгонами, спекающимися в трудноразрушаемые настывы, а также к закарбизированию подины печи. Авторы предлагают использовать борсодержащий флюс (колеманит), снижающий температуру плавления опытных шлаков за счет образования низкотемпературных фаз волластанита $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (температура плавления 1464 °С) и бората кальция $\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ (температура плавления 1160 °С). По данным лабораторных исследований и термодинамического моделирования оптимальной температурой процесса выплавки борсодержащего силикохрома является температура 1677 °С. Показано, что технология плавки борсодержащего силикохрома реализуема с высокими технико-экономическими показателями.

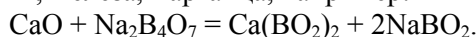
Автор работы [52] представил результаты использования боратовой руды при выплавке различных ферросплавов: ферросилиция, силикохрома и углеродистого феррохрома. Автор описал вопрос стабилизации от распада высокоосновных шлаков выплавки рафинированных марок феррохрома.

Выплавка технического кремния

Работы [53, 54] посвящены изучению влияния добавки борсодержащего флюса в окисидные системы на вязкость шлаков и экспериментам по выплавке технического кремния. В работе [54] представлены результаты экспериментов по выплавке технического кремния в одноэлектродной электродуговой печи мощностью 250 кВ·А, установленной в Карагандинском индустриальном университете, с добавкой в шихту борсодержащего флюса. Необходимость использования его при выплавке в составе загружаемой шихты была вызвана наличием на подине электродуговой печи скопившейся тугоплавкой магматической массы, состоящей из тугоплавких оксидов, не восстановившихся в процессе карботермической плавки [55, 56], что затрудняет выпуск кремниевого расплава из печи.

Металлургия драгоценных металлов

В металлургии драгоценных металлов бура используется в качестве флюсовой добавки при пирометаллургических операциях различных технологических схем переработки, плавке катодных осадков с получением сплава золота лигатурного [8–10, 57], а также при проведении пробирного анализа [11]. Данный анализ предназначен для определения Au, Ag в различных сырьевых и промежуточных продуктах переработки руд и концентратов, содержащих драгоценные металлы. Бура имеет низкую температуру плавления (для безводной буры она составляет 741 °С), способствует полному разложению рудного материала и образованию жидкотекучего шлака. Поэтому в ряде случаев при плавке при необходимом повышенном соотношении $\text{SiO}_2:\text{MeO}$ для получения маловязких жидкотекучих шлаков в плавку дополнительно вводят буру. Особенно бура пригодна для ошлакования оксидов цинка, меди, магнезия, кальция, алюминия, железа, марганца, например:



SiO_2 с этими оксидами образует довольно вязкие и тугоплавкие соединения.

Состав и соотношение компонентов шихты в данном анализе определяется составом анализируемого материала.

Заключение

Изучен опыт применения борсодержащих материалов (чистого борного ангидрида, боратовых руд (колеманита), отходов от производства борсодержащего стекла) для решения проблем, связанных с повышенной температурой плавления шлаковых расплавов и их высокой вязкостью, в различных направлениях черной и цветной металлургии: подготовке окускованной шихты для доменной плавки, выплавке чугуна, стали, различных ферросплавов, проведении пробирного анализа драгоценных металлов и плавке различных золотосодержащих продуктов. При всем разнообразии направлений применения борсодержащих материалов неизменным остается главное: положительный технологический эффект, основанный на способности борсодержащих флюсов снижать температуру плавления оксидных систем и повышать жидкоподвижность шлаков.

Список литературы

1. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. DOI: 10.17580/tsm.2016.01.05. EDN: VWTIRH.
2. Основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций / Н.И. Анелькин, А.В. Манцевич, Д.Г. Войтеховский, С.А. Мозгов // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 31–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2023-2-31-44. EDN: QITCLS.
3. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года».
4. Shen X.P., Priestner R. Effect of boron on the microstructure and tensile properties of dual phase steel // Metallurgical Transactions A. 1990. Vol. 21. P. 2547–2553. DOI: 10.1007/BF02647000
5. Новое применение бора в металлургии / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 1 (9). С. 15–17. EDN: PXYTKX.
6. Komenda J., Luo C., Lönnqvist J. Interaction of carbon, titanium, and boron in micro-alloy steels and its effect on hot ductility // Alloys. 2022. Vol. 1. P. 133–148. DOI: 10.3390/alloys1020009
7. The effects of boron addition on the magnetic and mechanical properties of NiMnSn shape memory alloys / Y. Aydogdu, A.S. Turabi, A. Aydogdu et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. Iss. 126. P. 399–406. DOI: 10.1007/s10973-016-5576-6
8. Effect of boron addition on the precipitation behavior of S31254 / J. Bai, Y. Cui, J. Wang et al. // Metals. 2018. Vol. 8. P. 497. DOI: 10.3390/met8070497
9. 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. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-7-471-476. EDN: AWOXRZ.
10. 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. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-9-660-668. EDN: ZCFTVF.
11. Григорян Г.Б., Арутюнян Ф.Г., Петросян Ю.Г. Полупромышленные испытания высоко-температурной электроплавки золотосодержащих концентратов // Цветные металлы. 1973. № 10. С. 17–19.
12. Лодейщиков В.В. Извлечение золота из упорных руд и концентратов. М.: Недра, 1968. 204 с.
13. Баликов С.В., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г. Плавка золотосодержащих концентратов. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2002. 323 с. ISBN 5-902324-01-7.
14. Haffty J., Riley L.B., Goss W.D. A manual on fire assaying and determination of the noble metals in geological materials // Geological survey bulletin 1445. 1977. Vol. 58. DOI: 10.3133/B1445
15. Юшина Т.И., Лыгач В.Н., Моисеева Р.Н. Современное состояние и перспективы освоения месторождений различных борсодержащих руд // Горный информационно-аналитический вестник (научно-технический журнал). 2014. № С1. С. 497–514. EDN: SYBZJV.
16. Обзор рынка бора, боропродуктов и борной кислоты в России и мире. 8-е изд. М.: ООО «ИГ «Инфолайн», 2018. 125 с.
17. Helvacı C. Occurrence of rare borate minerals: Veatchite-A, tunellite, teruggite and cahnite in the Emet borate deposits, Turkey // Mineral. Deposita. 1984. Vol. 19. P. 217–226.
18. Gündogdu M.N. Geological, mineralogical and geochemical characteristics of zeolite deposits associated with borates in the Bigadiç, Emet and Kirka Neogene lacustrine basins, Western Turkey // Mineral. Deposita. 1996. Vol. 31. P. 492–513.
19. Koç Ş. Geochemistry of Kestelek colemanite deposit, Bursa, Turkey // Journal Earth Science. 2017. Vol. 28, iss. 1. P. 63–77. DOI: 10.1007/s12583-015-0616-x
20. Апробация технологии выплавки технического кремния с применением брикетированной смеси на основе микрокремнезема и отсевов углеродистого восстановителя: отчет о НИР // КарИУ, рук. А.Х. Нурумгалиев, исполн.: Б.А. Жаутиков, А.С. Ким, А.А. Айкеева, Н.Н. Зобнин [и др.]. Темиртау, 2019. 67 с. № 276611/2019/1 от 24.04.2019 г.

21. Пеков И.В., Абрамов Д.В. Индерское месторождение бора и его минералы // Мир камня. 1993. № 1. С. 8–13.
22. Цыпин Е.Ф. Информационные методы обогащения полезных ископаемых: учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ, 2015. 206 с. ISBN 978-5-8019-0365-1. EDN: WAJJTP.
23. Патеюк С.А. Научное обоснование применения флотационного реагента-собиранителя – олеилсаркозината натрия для повышения технологических показателей переработки отходов производства борной кислоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2022. 26 с.
24. Лисицын А.Е., Моисеева Р.Н. Минеральное сырье. Бор: справ. / Министерство природных ресурсов РФ. М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1997. 46 с.
25. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Медведовская И.А. Влияние B_2O_3 на вязкость шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ // Известия АН СССР. Металлы. 1986. № 3. С. 55–56. EDN: 0368-0797.
26. Юрьев Б.П. Разработка технологии по использованию боратовой руды при получении железорудных окатышей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75, № 2. С. 198–206. EDN: VVHSBG.
27. Акбердин А.А., Ким А.С., Саркенов К.З. Разработка и промышленные испытания технологии производства легированных бором железорудных окатышей // Известия Евразийского университета. 2000. № 1 (1). С. 69–78.
28. Акбердин А.А., Ким А.С. Резервы доменного процесса для производства высококачественного стального проката // Научно-технический прогресс в металлургии: тр. Междунар. конф. (г. Темиртау, 29–30 сентября 2005 г.). Темиртау, 2005. С. 148–156.
29. Утков В.А. Высокоосновный агломерат. М.: Металлургия, 1977. 156 с.
30. Пат. KZ (C)(11) 4468. Способ производства агломерата / А.А. Акбердин, А.С. Ким, А.М. Миронович и др.; заявл. 06.06.1989; опубл. 14.03.1997.
31. Акбердин А.А., Ким А.С. Доменная плавка на борсодержащих шлаках // Теория и практика производства чугуна: тр. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию КГГМК «Кривокожесталь». Кривой Рог, 2004. С. 146–149.
32. Тлеугабдулов Б.С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2010. 24 с.
33. Тлеугабдулов Б.С. Применение борсодержащих добавок в агломерации и доменной плавке титаномагнетитов // Вестник УГТУ-УПИ. 2006. № 4 (75). С. 120–124.
34. Оценка эффективности использования высокоосновных борсодержащих шлаков при выплавке экономнолегированных борсодержащих сталей / А.С. Ким, А.А. Акбердин, Р.Б. Султангазиев, Г.М. Киреева // Металлург. 2018. № 1. С. 40–44. EDN: YNJFRW.
35. Пат. KZ (13)A4(11) 30964. Шлаковая смесь для обработки стали в ковше / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Е.Н. Селиванов и др.; заявл. 28.07.2014; опубл. 15.03.2016.
36. Шартдинов Р.Р. Влияние физико-химических характеристик шлаков аргоноокислородного рафинирования на восстановление хрома, бора и десульфурацию нержавеющей стали: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2023. 169 с.
37. Effects of Basicity on the Phase Composition, Structure, Viscosity, and Crystallization Temperature of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-B_2O_3$ Slags / А.А. Babenko, R.R. Shartdinov, A.G. Upolovnikova, A.N. Smetannikov // Metallurgist. 2023. Vol. 67. P. 166–175. DOI: 10.1007/s11015-023-01499-z
38. Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, Е.В. Протопопов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65, № 6. С. 406–412. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-6-406-412. EDN: LJFXBV.
39. Применение бора и его соединений в металлургии: моногр. / В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев, А.А. Акбердин [и др.]. Новосибирск: Академиздат, 2018. 156 с. ISBN 978-5-6040423-0-4. EDN: YPRCGD.
40. Кель И.Н. Физико-химические исследования и разработка технологии получения комплексных борсодержащих ферросплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2021. 24 с.
41. Разработка технологии выплавки комплексного борсодержащего алюмокремниевый ферросплав / А.А. Акбердин, А.С. Ким, А.С. Орлов, Р.Б. Султангазиев // Труды университета. 2023. № 3 (92). С. 96–102. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_96. EDN: CPIDOB.

42. Разработка технологии выплавки комплексного борсодержащего алюмокремниевое ферросплава / А.А. Акбердин, А.С. Ким, Л.Б. Толымбекова, Р.Б. Султангазиев // *Металлург.* 2023. № 6. С. 29–34. DOI: 10.52351/00260827_2023_06_29. EDN: BSXWBT.
43. Ефимец А.М. Разработка и промышленное освоение электротермического способа производства ферросилиция с использованием боратовых руд: дис. ... канд. техн. наук. Караганда, 2003. 116 с.
44. Ефимец А.М., Акбердин А.А., Ким А.С. Разработка и промышленное освоение технологии производства ферросилиция в руднотермических печах на борсодержащих шлаках // *Труды Карагандинского государственного технического университета.* 1999. Вып. 5. С. 65–68.
45. Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Исследование кинетики взаимодействия карбида кремния с расплавленным шлаком производств ферросилиция // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2017. Т. 21, № 9. С. 191–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-9-191-200. EDN: ZIVWHV.
46. Пат. KZ C(11) 4476. Способ производства высокоуглеродистого феррохрома / А.А. Акбердин, В.А. Матвиенко, А.А. Иванов и др.; заявл. 25.09.89; опубл. 14.03.1997.
47. Пат. RU 2222629 C2. Способ выплавки рафинированного феррохрома / В.И. Гриненко, П.С. Петлюх, А.Б. Есенжулов и др. № 2002106995/02; заявл. 18.03.2002; опубл. 27.01.2004.
48. Пат. KZ (13)B(11) 24444. Способ выплавки рафинированного феррохрома / А.А. Грабеклис, Б.Л. Демин, А.А. Кольбаев и др.; заявл. 25.05.2009; опубл. 15.08.2011.
49. Инновационный пат. KZ (13)A4(11) 20999. Способ получения силикомарганца / А.А. Акбердин, А.С. Ким, У.К. Конуров; заявл. 20.08.07; опубл. 16.03.2009.
50. Выплавка высокоуглеродистого ферромарганца на высокоосновных шлаках / О.Р. Сариев, М.С. Досекенов, Б.С. Келаманов, А.М. Абдирашит // *Комплексное использование минерального сырья.* 2020. № 4 (315). С. 64–73. DOI: 10.31643/2020/6445.38
51. Экспериментальные лабораторные исследования по разработке оптимальных технологических параметров выплавки борсодержащего силикохрома / А.С. Ким, А.А. Акбердин, Р.Б. Султангазиев и др. // *Труды университета.* 2022. № 4 (89). С. 72–79. DOI: 10.52209/1609-1825_2022_4_72
52. Ким А.С. Особенности выплавки ферросплавов с использованием боратовых руд // *Сталь.* 2008. № 8. С. 55–58. EDN: JUWNUZ.
53. Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO–SiO₂ и CaO–SiO₂–B₂O₃ / Н.В. Немчинова, А.А. Ильин, А.А. Тютрин и др. // *iPolytech Journal.* 2024. Т. 28, № 3. С. 562–575. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-562-575. EDN: IXGBEL.
54. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial SAF using borate fluxes / А.А. Ilin, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova, N.V. Nemchinova // *Silicon.* 2024. Vol. 16. P. 3085–3092. DOI: 10.1007/s12633-024-02895-z
55. Рагулина Р.И., Емлин Б.И. Электротермия кремния и силумина. М.: Металлургия, 1972. 239 с.
56. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевое производство // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2017. № 1. С. 31–39. DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-31-39. EDN: XWTXUH.
57. Аппаратурное оформление пирометаллургической переработки золотосодержащих продуктов / С.В. Баликов, В.Е. Дементьев, В.Я. Бывальцев и др. // *Добыча и переработка золота и алмазосодержащего сырья: сб. науч. тр. (посвящен 130-летию института «Иргиредмет»).* Иркутск, 2001. С. 152–167.

References

1. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategy tasks of the russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally.* 2016;(1):32–37. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2016.01.05. EDN: VWTIRH.
2. Anelkin N.I., Mantsevich A.V., Voitekhovskiy D.G., Mozgov S.A. The main directions of national metallurgy development in the context of global trends. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy).* 2023;(2):31–44. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2023-2-31-44. EDN: QITCLS.
3. *Prikaz Ministerstva promyshlennosti i trgovli RF ot 5 maya 2014 g. No. 839 "Ob utverzhdenii Strategii razvitiya chernoy metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda i Strategii razvitiya tsvetnoy metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda"*

[Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation dated May 5, 2014 No. 839 “On approval of the Development Strategy of the Russian Ferrous Metallurgy for 2014–2020 and for the period until 2030 and the Development Strategy for the Non-ferrous Metallurgy of Russia for 2014–2020 and for the period until 2030”]. (In Russ.)

4. Shen X.P., Priestner R. Effect of boron on the microstructure and tensile properties of dual phase steel. *Metallurgical Transactions A*. 1990;21:2547–2553. DOI: 10.1007/BF02647000

5. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhigarev M.A. A new application of boron in metallurgy. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2005;1(9):15–17. (In Russ.) EDN: PXYTKX.

6. Komenda J., Luo C., Lönnqvist J. Interaction of carbon, titanium, and boron in micro-alloy steels and its effect on hot ductility. *Alloys*. 2022;1:133–148. DOI: 10.3390/alloys1020009

7. Aydogdu Y., Turabi A.S., Aydogdu A., Kok M., Yakinci Z.D., Karaca H.E. The effects of boron addition on the magnetic and mechanical properties of NiMnSn shape memory alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;126:399–406. DOI: 10.1007/s10973-016-5576-6

8. Bai J., Cui Y., Wang J., Dong N., Dong N., Qurashi M.S., Wei H., Yang Y., Han P. Effect of Boron Addition on the Precipitation Behavior of S31254. *Metals*. 2018;8:497. DOI: 10.3390/met8070497

9. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2021;64(7):471–476. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2021-7-471-476. EDN: AWOXRZ.

10. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 2. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2021;64(9):660–668. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2021-9-660-668. EDN: ZCFTVF.

11. Grigoryan G.B., Harutyunyan F.G., Petrosyan Yu.G. [Semi-industrial tests of high-temperature electric melting of gold-containing concentrates]. *Tsvetnye metally*. 1973;(10):17–19. (In Russ.)

12. Lodeyshchikov V.V. *Izvlечeniye zolota iz upornykh rud i kontsentratov* [Extraction of gold from stubborn ores and concentrates]. Moscow: Nedra; 1968. 204 p. (In Russ.)

13. Balikov S.V., Dement'yev V.Y., Mineyev G.G. *Plavka zolotosoderzhashchikh kontsentratov* [Melting of gold-bearing concentrates]. Irkutsk: JSC “Irgiredmet”; 2002. 323 p. (In Russ.)

14. Haffty J., Riley L. B., Goss W.D. A manual on fire assaying and determination of the noble metals in geological materials. *Geological survey bulletin 1445*. 1977:58. DOI: 10.3133/B1445

15. Yushina T.I., Lygach V.N., Moiseeva R.N. Boron-containing ore mining: state-of-the-art and prospects. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;C1:497–514. (In Russ.) EDN: SYBZFFV.

16. *Obzor rynka bora, boroproduktov i bornoy kisloty v Rossii i mire* [Market overview of boron, boron products and boric acid in Russia and the world]. 8th ed. Moscow: INFOMINE Research Group; 2018. 125 p. (In Russ.)

17. Helvacı C. Occurrence of rare borate minerals: Veatchite-A, tunellite, teruggite and cahnite in the Emet borate deposits, Turkey. *Mineral. Deposita*. 1984;19:217–226.

18. Gündogdu M.N. Geological, mineralogical and geochemical characteristics of zeolite deposits associated with borates in the Bigadiç, Emet and Kirka Neogene lacustrine basins, Western Turkey. *Mineral. Deposita*. 1996;31:492–513.

19. Koç Ş. Geochemistry of Kestelek colemanite deposit, Bursa, Turkey. *Journal Earth Science*. 2017;28(1):63–77. DOI: 10.1007/s12583-015-0616-x

20. *Aprobatsiya tekhnologii vyplavki tekhnicheskogo kremniya s primeneniye briketirovannoy smesi na osnove mikrokretnezema i otsevo uglerodistogo vosstanovitelya: otchet o NIR* [Approbation of the technology of technical silicon smelting using a briquetted mixture based on silica and carbonaceous reducing agent screenings: research report]. KarIU, Nurumgaliev A.H., Zhautikov B.A., Kim A.S., Aykeeva A.A., Zobnin N.N. et al. Temirtau; 2019. 67 p. No. 276611/2019/1 dated 24.04.2019. (In Russ.)

21. Pekov I.V., Abramov D.V. Inder Deposits of Bur and Minerals. *World of Stone*. 1993;(1):8–13. (In Russ.)

22. Tsy-pin E.F. *Informatsionnyye metody obogashcheniya poleznykh iskopayemykh: ucheb. posobiye* [Information methods of mineral processing: textbook. stipend.]. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2015. 206 p. (In Russ.) ISBN 978-5-8019-0365-1. EDN: WAJJTP.

23. Pateyuk S.A. *Nauchnoye obosnovaniye primeneniya flotatsionnogo reagenta-sobiratelya – oleilsarkozinata natriya dlya povysheniya tekhnologicheskikh pokazateley pe-rerabotki otkhodov proizvodstva bornoy kisloty: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Scientific Substantiation of the use of a Flotation Collector Reagent, Sodium Oleylsarcosinate, to Improve the Technological Performance of Boric Acid Waste Treatment. Abstract of cand. diss.]. Chita; 2022. 26 p. (In Russ.)
24. Lisitsyn A.E., Moiseeva R.N. *Mineral'noe syr'e. Bor: spravochnik* [Mineral raw materials. Bor]. Moscow: JSC Geoinformmark; 1997. 46 p. (In Russ.)
25. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Medvedovskaya I.A. [Effect of B₂O₃ on CaO–SiO₂–Al₂O₃ System Slag Viscosity]. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals*. 1986;(3):55–56. (In Russ.) EDN: 0368-0797.
26. Yuryev B.P. Development of technology for the use of borate ore in the production of iron ore pellets. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019;75(2):198–206. (In Russ.) EDN: VVHSBG.
27. Akberdin A.A., Kim A.S., Sarekenov K.Z. Development and industrial testing of technology of boron-doped iron ore pellets. *Izvestiya Evraziiskogo universiteta*. 2000;1(1):69–78. (In Russ.)
28. Akberdin A.A., Kim A.S. [Reserves of the blast furnace process for production of high-quality rolled steel]. In: *Scientific and technical progress in metallurgy: proceedings of the International Conference (Temirtau, September 29–30, 2005)*. Temirtau; 2005. P. 148–156. (In Russ.)
29. Utkov V.A. *Vysokoosnovnyy aglomerat* [Highly basic agglomerate]. Moscow: Metallurgiya; 1977. 156 p. (In Russ.)
30. Akberdin A.A., Kim A.S., Mironovich A.M., Malygin A.V., Vikulov G.S., Kabanov Yu.A., Golovkin V.K., Leonidovich N.L. *Agglomerate production method*. Patent KZ (C)(11) 4468, 1997. (In Russ.)
31. Akberdin A.A., Kim A.S. [Blast furnace smelting with boron-containing slags]. In: *Theory and Practice of Cast Iron Production: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 70th Anniversary of KGMK Krivorozhstal*. Krivoi Rog; 2004. P. 146–149. (In Russ.)
32. Tleugabulov B.S. *Sovershenstvovaniye shlakovogo rezhima domennoy plavki za schet ispol'zovaniya dobavok: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the slag regime of blast furnace melting through the use of additives. Abstract of cand. diss.]. Ekaterinburg; 2010. 24 p. (In Russ.)
33. Tleugabulov B.S. [Application of boron-containing additives in agglomeration and blast furnace smelting of titanomagnetites]. *Bulletin of the Ural State Technical University – UPI*. 2006;4(75):120–124. (In Russ.)
34. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziyev R.B., Kireyeva G.M. Evaluation of the efficiency of using highly basic boron-containing slags in the smelting of economically alloyed boron-containing steels. *Metallurgist*. 2018;1:40–44. (In Russ.) EDN: YNJFRW.
35. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N., Sychev A.V., Zorin A.N., Dobromilov A.A., Kutdusova H.S., Savrasov A.I., Kim A.S., Akberdin A.A. *Slag mixture for steel processing in a ladle*. Patent KZ (13)A4(11) 30964, 2016. (In Russ.)
36. Shartdinov R.R. *Vliyaniye fiziko-khimicheskikh kharakteristik shlakov argonokislorodnogo rafinirovaniya na vosstanovleniye khroma, bora i desulfuratsiyu nerzhavayushchey stali: dis. kand. tekhn. nauk* [The effect of physico-chemical characteristics of argon-oxygen refining slags on the reduction of chromium, boron and desulfurization of stainless steel. Cand. sci. diss.]. Ekaterinburg; 2023. 169 p. (In Russ.)
37. Babenko R.R., Shartdinov A.G., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N. Effects of Basicity on the Phase Composition, Structure, Viscosity, and Crystallization Temperature of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ Slags. *Metallurgist*. 2023;67:166–175. DOI: 10.1007/s11015-023-01499-z
38. Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N. Fundamental studies of physical-mechanical properties of environmentally friendly fluorine-free slags and their use in ladle steel industry. *Steel in Translation*. 2022;52(6):568–573. DOI: 10.3103/S096709122206002X. EDN: NIUJQ.
39. Zhuchkov V.I., Leontiev L.I., Akberdin A.A., Babenko A.A., Sychev A.V. *Primenenie bora i ego soedineniy v metallurgii: monogr.* [Application of boron and its compounds in metallurgy: monograph]. Novosibirsk: Akademizdat; 2018. 156 p. (In Russ.) ISBN 978-5-6040423-0-4. EDN: YPRCGD.
40. Kel I.N. *Fiziko-khimicheskiye issledovaniya i razrabotka tekhnologii polucheniya kompleksnykh borsoderzhashchikh ferrosplavov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Physico-chemical research and deve-

lopment of technology for the production of complex boron-containing ferroalloys. Abstract of cand. diss.]. Ekaterinburg; 2021. 24 p. (In Russ.)

41. Akberdin A.A., Kim A.S., Orlov A.S., Sultangaziev R.B. Development of technology for smelting complex boron-containing aluminum-silicon ferroalloy. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2023;3(92):96–102. (In Russ.) DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_96. EDN: CPIDOB.

42. Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B., Tolymbekova L.B. Development of technology for producing complex boron-containing aluminum-silicon ferroalloy. *Metallurgist*. 2023;(6):29–34. (In Russ.) DOI: 10.52351/00260827_2023_06_29. EDN: BSXWBT.

43. Efimets A.M. *Razrabotka i promyshlennoe osvoenie elektrotermicheskogo sposoba proizvodstva ferrosilitsiya s ispol'zovaniem boratovykh rud: dis. kand. tekhn. nauk* [Development and industrial development of an electrothermal method for the production of ferrosilicon using borate ores. Cand. sci. diss.]. Karaganda; 2003. 116 p. (In Russ.)

44. Efimets A.M., Akberdin A.A., Kim A.S. [Development and industrial implementation of ferrosilicon production technology in ore-smelting furnaces using boron-containing slag]. *Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Karaganda State Technical University]. 1999;(5):65–68. (In Russ.)

45. Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B. Study of interaction kinetics of silicon carbide and ferrosilicon production molten slag. *Proceedings of Irkutsk state technical university = Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;21(9):191–200. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-9-191-200. EDN: ZIVWHV.

46. Akberdin A.A., Matvienko V.A., Ivanov A.A., Kim A.S., Kireeva G.M., Timofeev G.D., Privalov O.E., Zamyslov V.G. *Method of production of high-carbon ferrochrome*. Patent KZ C(11) 4476, 1997. (In Russ.)

47. Hrynenko V.I., Petliuh P.S., Esenzhulov A.B., Kavanov B., Sorokin S.V., Babenko A.A., Grabeklis A.A., Demin B.L. *The method of smelting refined ferrochrome*. Patent RU 2222629 C2, 2004. (In Russ.)

48. Grabeklis A.A., Demin B.L., Kolbaev A.A., Kabanov B., Kairakbaev S.N. *The method of smelting refined ferrochrome*. Patent KZ (13)B(11) 24444, 2011. (In Russ.)

49. Akberdin A.A., Kim A.S., Konurov U.K. *The method of obtaining silicomanganese*. Innovation patent KZ (13)A4(11) 20999, 2009. (In Russ.)

50. Sariev O.R., Dossekenov M.S., Kelamanov B.S., Abdirashit A.M. High-carbon ferromanganese smelting on high-base slags. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources*. 2020;4(315):64–73. (In Russ.) DOI: 10.31643/2020/6445.38

51. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziev R.B., Orlov A.S., Adamova G.H. Experimental laboratory studies on the development of optimal technological parameters for the smelting of boron-containing silicochrome. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2022;4(89):72–79. (In Russ.) DOI: 10.52209/1609-1825_2022_4_72

52. Kim A.S. Smelting ferroalloys by means of borate ores. *Steel in Translation*. 2008;38(8):664–667. DOI: 10.3103/S0967091208080196. EDN: LLJBCZ.

53. Nemchinova N.V., Ilin A.A., Tyutrin A.A., Galachieva S.V., Yakovleva A.A. Structure and dynamic viscosity of CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ model slag systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):562–575. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-562-575. EDN: IXGBEL.

54. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of Iron and Boron Between Silicon Metal Smelting Products in Industrial SAF using Borate Fluxes. *Silicon*. 2024;16:3085–3092. DOI: 10.1007/s12633-024-02895-z

55. Ragulina R.I., Emlin B.I. *Elektrotermiya kremniya i silumina* [Electrothermy of silicon and silumin]. Moscow: Metallurgiya; 1972. 239 p. (In Russ.)

56. Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous metallurgy*. 2017;(1):31–39. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-31-39. EDN: XWTXUH.

57. Balikov S.V., Demytyev V.E., Byvaltsev V.Ya., Panchenko A.F. et al. Hardware design of pyrometallurgical processing of gold-bearing products. In: *Dobycha i pererabotka zoloto- ialmazoderzhashchego syr'ya: sb. nauch. tr. (posvyashchen 130-letiyu instituta "Irgiredmet")* [Extraction and processing of gold and diamond-containing raw materials: Collection of scientific papers (dedicated to 130th anniversary of Irgiredmet Institute)]. Irkutsk; 2001. P. 152–167. (In Russ.)

Информация об авторах

Немчинова Нина Владимировна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой металлургии цветных металлов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия; ninavn@yandex.ru.

Баликов Станислав Васильевич, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия; balikov@irgiredmet.ru.

Ильин Александр Александрович, научный сотрудник, Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан; worldilyins@gmail.com.

Гапошин Андрей Дмитриевич, студент группы МЦб-22 кафедры металлургии цветных металлов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия; gaposhin2001@gmail.com.

Information about the authors

Nina V. Nemchinova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia; ninavn@yandex.ru.

Stanislav V. Balikov, Dr. Sci. (Eng.), Senior Research, Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia; balikov@irgiredmet.ru.

Alexander A. Ilin, Researcher, Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan; worldilyins@gmail.com.

Andrey D. Gaposhin, Student of group MCb-22 of the Department of Non-Ferrous Metallurgy, Metals Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia; gaposhin2001@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 07.01.2025

The article was submitted 07.01.2025