

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОГО МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ БОРОМ НА ИХ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА\*

**Бабенко А.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали  
и ферросплавов (babenko251@gmail.com)

**Жучков В.И.<sup>1</sup>**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали  
и ферросплавов (ntm2000@mail.ru)

**Акбердин А.А.<sup>2</sup>**, д.т.н., заведующий лабораторией «Бор» (akberdin\_38@mail.ru)

**Сычев А.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов

**Ким А.С.<sup>2</sup>**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории «Бор» (boron\_213@mail.ru)

<sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>2</sup> «Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева»,

филиал РГП Национальный центр по комплексной переработке сырья РК

(100009, Казахстан, Караганда, ул. Ермекова, 63)

**Аннотация.** В конвертерном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» разработана и освоена технология прямого микролегирования конструкционных сталей бором. Микролегирование проведено за счет восстановления бора из формируемых на установках ковш-печь шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ . Применение разработанной технологии обеспечило в сталях 08кп, 3сп, 3пс и 09Г2С содержание бора 0,0016 – 0,0050 %, достаточно высокую степень десульфурации металла 36,8 – 51,7 %, сокращение расхода марганцевых ферросплавов на 0,3 – 0,6 кг/т стали, улучшение экологической обстановки за счет отказа от применения плавикового шпата. Для стали марки 09Г2С предел текучести  $\sigma_t$  и временного сопротивления  $\sigma_v$  экспериментального металла выше, чем у стали без бора в среднем на 27 и 24 МПа соответственно. Величина относительного удлинения  $\delta$  металлопроката с бором увеличилась в среднем на 0,2 %. Балл зерна металлопроката толщиной 2,0 – 2,5 мм стали 08кп, содержащей 0,001 % бора, с пониженной до 0,18 % концентрацией марганца, достигает 10,0 против 9,0 на плавках текущего производства. Предел текучести  $\sigma_t$  и временное сопротивление  $\sigma_v$  экспериментального металла в среднем на 6,0 и 5,0 МПа выше, чем у сравнительного. Относительное удлинение  $\delta$  экспериментального металла достигает 36,3 % (на плавках текущего производства 33,3 %). Экспериментальный металлопрокат стали марки 3пс с пониженной на 0,02 % концентрацией марганца, содержащий в среднем 0,001 % бора, характеризуется повышенными пределом текучести, временным сопротивлением (в среднем на 2,0 и 9,0 МПа соответственно) и относительным удлинением, достигающим в среднем 21,0 %, мелкозернистой структурой. Металлопрокат стали 3сп, микролегированной бором, толщиной 4,0 мм с пониженным до 0,43 % содержанием марганца, характеризуется улучшенными прочностными свойствами с сохранением пластических характеристик. Абсолютная величина предела текучести и временное сопротивление на разрыв стали на 4,0 и 2,0 МПа больше прочностных характеристик стали без бора.

**Ключевые слова:** конструкционная сталь, прямое микролегирование, бор, сера, марганец, структура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-716-720

### ВВЕДЕНИЕ

Микролегируемые стали достаточно широко применяются в промышленности, так как обладают целым комплексом высоких механических свойств в сочетании с пониженной себестоимостью [1 – 7]. Особое место среди микролегирующих элементов занимает бор [3 – 7]. Присадки бора в жидкий металл в количестве 0,001 – 0,003 % характеризуются разделением по температурной шкале области ферритного и бейнитного превращений С-образной кривой и существенным торможением процесса образования полигонального феррита, не задерживая самой бейнитной реакции [7].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00825.

обеспечивая при этом повышение прочностных свойств с сохранением пластических характеристик. Благодаря, например, дополнительному микролегированию трубной стали бором удалось получить металл класса прочности X120 [8].

В литературе большинство работ по использованию бора в металлургии посвящено его влиянию на структуру и свойства обрабатываемого металла (стали и др.) [9 – 13]. Комплексное легирование и модифицирование стали бором улучшает ее механические свойства [14 – 16], позволяет предотвратить трансформацию и измельчить микроструктуру в отливках. Показано положительное влияние боросодержащих материалов на физико-химические свойства шлаков [17].

Микролегирование стали бором осуществляют, как правило, присадками борсодержащих ферросплавов, использование которых увеличивает себестоимость стали. В некоторых работах рассматривается возможность восстановления бора из оксидных борсодержащих систем и перехода его в сталь [4, 6].

Целью настоящей работы является исследование влияния прямого микролегирования бором на структуру и механические свойства стали марок 08кп, 3сп, 3пс и 09Г2С.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе для исследования влияния прямого микролегирования конструкционных сталей на структуру и механические свойства использовали образцы горячекатаной стали марок 08кп, 3сп, 3пс и 09Г2С. Выплавку опытных и сравнительных плавов стали осуществляли в конвертерном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» из фосфористых чугунов в соответствии с действующей технологической инструкцией [18]. Раскисление металла экспериментальных плавов осуществляли на выпуске и на установке ковш-печь (УКП) с расходом марганецсодержащих ферросплавов, ориентированным на нижний предел по содержанию марганца. Обработку металла на УКП проводили в соответствии с технологической инструкцией [19] с использованием технологических приемов формирования на УКП основного борсодержащего шлака. Формирование основных борсодержащих шлаков осуществляли на УКП загрузкой в сталеразливочный ковш извести, борсодержащего материала – колеманита (Турция), содержащего 39 – 41 %  $B_2O_3$ , 26 – 28 % CaO, не более 5 %  $SiO_2$  и 3 % MgO, алюминия для раскисления шлака и восстановления бора [20]. Структуру и механические свойства опытных и сравнительных образцов металлопроката определяли в лабораториях металловедения и механических испытаний АО «АрселорМиттал Темиртау» по стандартным методикам<sup>1</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Независимо от марки выплавляемой стали соблюдение рекомендованных расходов и режимов присадки на УКП извести, колеманита (борсодержащего материала), алюминия, карбида кальция и марганецсодержащих ферросплавов обеспечивает стабильное содержание бора на уровне 0,0016 – 0,005 %, достаточно высокую степень десульфурации металла, достигающую 36,8 – 51,7 %, и относительно низкую концентрацию марганца в стали. Так, например, в стали, раскисленной только алюминием (08кп), при среднем содержании бора 0,0016 % его концентрация изменяется в пределах 0,001 – 0,003 %, степень десульфурации металла

достигает в среднем 45,4 %, обеспечивая содержание серы в стали 0,012 % при исходной ее концентрации в металле на выпуске из конвертера 0,022 %. Содержание марганца в стали составляет в среднем 0,23 % при пониженном расходе ферромарганца на плавку. При этом более 75 % плавов разливают на МНЛЗ с содержанием марганца 0,20 % и менее. Аналогичные результаты получены на плавках стали марок 3пс, 3сп и 09Г2С. Отдельные технологические и технико-экономические показатели опытных плавов приведены в табл. 1.

Механические свойства горячекатаного металлопроката экспериментальных плавов и плавов текущего производства в зависимости от толщины проката и содержания бора и марганца в металле четырех групп марок стали (08кп, 3пс, 3сп и 09Г2С) представлены в табл. 2.

Установлено, что горячекатаный металлопрокат экспериментальных плавов, содержащий 0,001 – 0,007 % бора, с низкой концентрацией марганца характеризуется по сравнению с плавками текущего производства более мелкозернистой структурой и высокими проч-

Т а б л и ц а 1

### Технологические и технико-экономические показатели экспериментальных плавов

Table 1. Technological and technical-economic indicators of experimental heats

Показатель	Марка стали опытных плавов			
	08кп	3пс	3сп	09Г2С
Содержание элемента в металле на выпуске, %				
[C] <sub>в</sub>	0,05	0,05	0,07	0,05
[Mn] <sub>в</sub>	0,05	0,05	0,05	0,03
[S] <sub>в</sub>	0,022	0,019	0,029	0,022
Расход материалов на выпуск в ковш, кг:				
SiMn	0	1200	1660	6830
FeMn	654	575	200	0
Расход материалов на УКП, кг:				
известь	1630	1500	1500	1520
колеманит	205	168	153	160
карбид кальция	80	16	55	135
Al (проволока)	0	0	210	0
Al (пирамидальный)	160	78	0	160
FeMn	0	74	0	0
Время обработки на УКП, мин	95,1	99,4	105,0	75,0
[B] <sub>г.м.</sub> , %	0,0016	0,0016	0,0018	0,0050
[Mn] <sub>г.м.</sub> , %	0,23	0,46	0,46	1,39
[S] <sub>кон.</sub> , %	0,012	0,012	0,014	0,012
$\Delta S_{отн.}$ , % (степень десульфурации)	45,4	36,8	51,7	45,4

<sup>1</sup> В работе принимали участие М.Ф. Витушенко, А.Н. Золин, А.А. Добромиллов, А.И. Саврасов, Х.Ш. Кутдусова.

Т а б л и ц а 2

**Механические свойства и структура горячекатаного металлопроката**

*Table 2. Mechanical properties and structure of hot rolled metal*

Марка стали	[B], %	[Mn], %	Толщина проката, мм	Балл зерна	Механические характеристики проката			Снижение удельного расхода марганцевых ферросплавов, кг/т
					$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\Delta$ , %	
08кп	0	0,2	2,0 – 2,5	9,0	315	365	33,3	0,3
	0,001	0,18		10,0	321	370	36,3	
Зпс	0	0,45	3,0	9,0	358	462	25	0,3
	0,001	0,43		11,0	360	471	21,0	
Зсп	0	0,47	4,0	9,5	366	491	33,8	0,6
	0,001	0,43		10,3	370	493	26,8	
09Г2С	0	1,39	10,0	9,7	440	545	26,0	0,3
	0,007	1,36		10,5	467	569	26,2	

ностными свойствами с сохранением пластических характеристик. Например, балл зерна металлопроката толщиной 2,0 – 2,5 мм стали 08кп, содержащей 0,001 % бора, с пониженной до 0,18 % концентрацией марганца, достигает 10,0 (на плавках текущего производства 9,0) и характеризуется повышенными прочностными и пластическими свойствами. Абсолютные величины предела текучести  $\sigma_T$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  экспериментального металла в среднем на 6,0 и 5,0 МПа выше, чем у сравнительного металла. Относительное удлинение  $\delta$ , характеризующее пластические свойства проката, достигает на экспериментальном металле 36,3 % (на плавках текущего производства 33,3 %). Уменьшение содержания марганца в стали с 0,20 до 0,18 % обеспечивает сокращение удельного расхода марганцевых ферросплавов на 0,3 кг/т стали.

Горячекатаный металлопрокат толщиной 3,0 мм полуспокойной стали марки Зпс с пониженной на 0,02 % концентрацией марганца, с содержанием в среднем 0,001 % бора характеризуется повышенными прочностными и пластическими свойствами по сравнению с металлом, не содержащим бора.

Экспериментальный металлопрокат характеризуется повышенным пределом текучести  $\sigma_T$ , временным сопротивлением  $\sigma_B$  (в среднем на 2,0 и 9,0 МПа) и относительным удлинением, достигающим в среднем 21,0 %, мелкозернистой структурой. Балл зерна металлопроката низкомарганцовистой борсодержащей стали равен 11,0, у металла в отсутствие бора с повышенным содержанием марганца 9,0. Уменьшение содержания марганца в стали с 0,45 до 0,43 % обеспечивает сокращение удельного расхода марганцевых ферросплавов на 0,3 кг/т стали.

Металлопрокат стали Зсп толщиной 4,0 мм с пониженным до 0,43 % содержанием марганца характеризуется по сравнению с металлопрокатом, не содержащим бора, улучшенными прочностными свойствами с со-

хранением пластических характеристик. Абсолютная величина предела текучести  $\sigma_T$  составляет 370,0 МПа, временное сопротивление на разрыв стали  $\sigma_B$  493,0 МПа, что на 4,0 и 2,0 МПа больше прочностных характеристик стали без бора. Металл характеризуется более мелкой структурой. Балл зерна металлопроката экспериментальных плавов стали составляет в среднем 10,3, на сравнительных плавках 9,5. Снижение содержания марганца в стали на опытных плавках на 0,04 % сопровождается уменьшением удельного расхода марганцевых ферросплавов в среднем на 0,6 кг/т стали.

Отмечено улучшение механических свойств горячекатаного проката низколегированной стали марки 09Г2С, содержащей 1,36 % марганца и 0,007 % бора. Предел текучести  $\sigma_T$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  экспериментального металла выше, чем у стали без бора в среднем на 27 и 24 МПа соответственно. Величина относительного удлинения металлопроката с бором увеличилась в среднем на 0,2 %. При этом экспериментальный металл характеризуется более мелкозернистой микроструктурой. Балл зерна экспериментального металлопроката достигает 10,5, на плавках текущего производства 9,7. Снижение содержания марганца в стали с 1,38 до 1,36 % обеспечило уменьшение расхода марганцевых ферросплавов в среднем на 0,3 кг/т стали.

На холоднокатаном прокате толщиной 0,25 – 0,50 мм стали марки 08кп сохраняется положительное влияние бора на механические свойства. Абсолютные величины предела текучести  $\sigma_T$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  экспериментального металла, содержащего 0,001 % бора, на 73 и 31 МПа больше, чем у металла, не содержащего бор. При этом величина относительного удлинения, характеризующая пластические свойства проката, достигает у экспериментального металла в среднем 33,6 %, на плавках в отсутствие бора 32,6 %.

## Выводы

Освоение в конвертерном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» технологии прямого микролегирования стали конструкционных марок под основными борсодержащими шлаками, формируемыми на У КП, обеспечило содержание бора на уровне 0,0016 – 0,0050 % и серы не более 0,012 – 0,014 %, уменьшение расхода марганцевых ферросплавов на 0,3 – 0,6 кг/т стали, исключение присадок в ковш ферробора, улучшение экологической обстановки за счет отказа от применения плавикового шпата, формирование мелкозернистой структуры и высокие механические характеристики горяче- и холоднокатаного металлопроката. Разработанный технологический прием прямого микролегирования сталей бором и глубокой десульфурации металла можно рекомендовать для внедрения на широком марочном составе борсодержащих сталей с низким содержанием серы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пилюшенко В.Л., Вихлещук В.А. Научные и технологические основы микролегирования стали. – М.: Металлургия, 2000. – 384 с.
2. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск-Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
3. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугуне и стали / Пер. с англ. В.А. Мчедlishvili и В.В. Ховрина; под ред. С.М. Винарова. – М.: Металлургиздат, 1961. – 459 с.
5. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
6. Бабенко А.А., Жучков В.И., Леонтьев Л.И. и др. Микролегирование стали бором – перспективное направление повышения конкурентоспособности отечественной металлопродукции. – В кн.: Тр. научно-практ. конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. С. 162 – 165.
7. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 182 с.
8. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F. Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe // Ironmaking and Steelmaking. 2005. Vol. 32. No. 4. P. 337 – 371.
9. Upadhyay N., Pujar M.G., Sakthivel T., Mallika C., Laha K., Mudali U.Kamachi. Effect of addition of boron and nitrogen on the corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo ferritic steel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 86. P. 606 – 614.
10. Zhang Ya-long, Zhang Ying-yi, Yang Fei-hua, Zhang Zuo-tai. Effect of alloying elements (Sb, B) on recrystallization and oxidation of Mn-containing IF steel // Journal of Iron and Steel Research Int. 2013. Vol. 20. No.3. P. 39 – 44.
11. Yang H., Wang Xi-xia, Qu Jin-bo. Effect of boron on CGHAZ microstructure and toughness of high strength low alloy steels // Journal of Iron and Steel Research Int. 2014. Vol. 21. No. 8. P. 787 – 792.
12. Pan Tao, Wang Xiaoyong, Su Hang, Yang Caifu. Effect of alloying element Al on hardenability and mechanical properties of micro-B treated ultra-heavy plate steels // Acta Metallurgica Sinica. 2014. Vol. 50. No.4. P. 431 – 438.
13. Wan Yong, Chen Weiqing. Effect of boron content on the microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2015. Vol. 30. No. 3. P. 574 – 579.
14. Kyung Chul Choa, Dong Jun Mun, Yang Mo Koo, Jae Sang Lee. Effect of niobium and titanium addition on the hot ductility of boron containing steel // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. No. 10. P. 3556 – 3561.
15. Lopez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C., Bedolla-Jacuinde A., El-Wahabi M., Cabrera J.M. Hot flow behavior of boron microalloyed steels // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 480. No. 1-2. P. 49 – 55.
16. Stumpf W., Banks K. The hot working characteristics of a boron bearing and conventional low carbon steel // Materials Science and Engineering: A. 2006. Vol. 418. No. 1. P. 86 – 94.
17. Wang H., Zhang T., Zhu H., Li G., Yan Y., Wang J. Effect of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No. 5. P. 702 – 706.
18. Технологическая инструкция ТИ СК-01 – 2007 «Выплавка стали в кислородных конвертерах». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
19. Технологическая инструкция ТИ СК-07 – 2007 «Внепечная обработка стали для слябовых МНЛЗ». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
20. Применение бора и его соединений в металлургии / В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев, А.А. Акбердин и др. – Новосибирск: Академиздат, 2018. – 156 с.

Поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

После доработки 6 июля 2020 г.

Принята к публикации 6 июля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 9, pp. 716–720.

## EFFECT OF DIRECT MICROALLOYING OF BORON-CONTAINING STRUCTURAL STEELS ON THEIR STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

A.A. Babenko<sup>1</sup>, V.I. Zhuchkov<sup>1</sup>, A.A. Akberdin<sup>2</sup>, A.V. Sychev<sup>1</sup>, A.S. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> “Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abisheva”, branch of the RSE National Center for Integrated Processing of Raw Materials of the Republic of Kazakhstan, Karaganda, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** In conditions of converter shop of JSC “ArcelorMittal Temirtau” the authors have developed and implemented the technology of

direct microalloying of structural steels with boron. Microalloying was carried out due to boron recovery from the slags of the CaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system formed in ladle furnaces. The use of the developed technology provided in steels 08KP, 3SP, 3PS and 09G2S boron content of 0.0016 – 0.0050 %, a sufficiently high degree of metal desulfurization 36.8 – 51.7 %, reduction in manganese ferroalloys consumption by 0.3 – 0.6 kg/t of steel, improving the environmental situation by eliminating the use of fluorspar. For 09G2S steel the yield  $\sigma_y$  and tensile  $\sigma_t$  strengths are higher for the experimental metal than for the steel without boron by an average 27 and 24 MPa, respectively. Percentage of elongation of the metal with boron increased by an ave-



range 0.2 %. Grain-size index of rolled metal of 08KP steel with a thickness of 2.0 – 2.5 mm, containing 0.001 % of boron and a manganese concentration lowered to 0.18 %, reaches 10.0 in contrast to 9.0 for the heats of the current production. The yield  $\sigma_y$  and tensile  $\sigma_t$  strengths are on average by 6.0 and 5.0 MPa higher for an experimental metal than for a comparative one. Percentage of elongation  $\delta$  reaches 36.3 % for the experimental metal unlike 33.3 % for the heats of the current production. Experimental rolled metal of 3PC steel with lower concentration of manganese lowered by 0.02 % and with an average boron content of 0.001 % is characterized by an increased yield strength  $\sigma_y$ , tensile strength  $\sigma_t$  (on average by 2.0 and 9.0 MPa) and percentage of elongation  $\delta$  reaching in average 21.0 %, and fine-grained structure. Rolled metal of 3SP steel, microalloyed with boron, with a thickness of 4 mm that contains manganese content reduced to 0.43 % is characterized by improved strength properties with preservation of plastic characteristics. The absolute value of the yield  $\sigma_y$  and tensile  $\sigma_t$  strengths of steel are by 4.0 and 2.0 MPa higher than the strength characteristics of steel without boron.

**Keywords:** red mud, sintering, residues, sinter pot, sinter burden, microstructural examination, low-alkali red mud, impact resistance, abrasion strength, ferrite bond, silicate bond.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-9-716-720

## REFERENCES

- Pilyushenko V.L., Vikhleshchuk V.A. *Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy mikrolegirovaniya stali* [Scientific and technological foundations of steel microalloying]. Moscow: Metallurgiya, 2000, 384 p. (In Russ.).
- Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Modification of steel for castings and ingots]. Chelyabinsk-Zaporozh'e: ZNTU, 2009, 356 p. (In Russ.).
- Gol'dshteyn Ya.E., Mizin V.G. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and microalloying of cast iron and steel]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).
- Grange R.A. *Boron, Calcium, Columbium, and Zirconium in Iron and Steel*. New York: Wiley; London: Chapman and Hall, 1957, 533 p. (Russ. ed.: *Bor, kal'tsii, niobii i tsirkonii v chugune i stali* [Boron, calcium, niobium and zirconium in cast iron and steel]. Vinarov S.M. ed. Moscow: Metallurgizdat, 1961, 459 p.).
- Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchie stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 192 p. (In Russ.).
- Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I. etc. Microalloying of boron – containing steel as a promising direction for increasing the competitiveness of domestic metal products. In: *Tr. nauchno-prakt. konf. "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR"* [Proc. of Sci. and Pract. Conference "Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering using Completed Fundamental Research and R&D"]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2013, pp. 162–165. (In Russ.).
- Pickering F.Brian. *Physical metallurgy and the design of steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. (Russ. ed.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalei*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 182 p.).
- Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F. Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 4, pp. 337–371.
- Upadhyay N., Pujar M.G., Sakthivel T., Mallika C., Laha K., Mudali U.Kamachi. Effect of addition of boron and nitrogen on the corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo ferritic steel. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 86, pp. 606–614.
- Zhang Ya-long, Zhang Ying-yi, Yang Fei-hua, Zhang Zuo-tai. Effect of alloying elements (Sb, B) on recrystallization and oxidation of Mn-containing IF steel. *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2013, vol. 20, no. 3, pp. 39–44.
- Yang H., Wang Xi-xia, Qu Jin-bo. Effect of boron on CGHAZ microstructure and toughness of high strength low alloy steels. *Journal of Iron and Steel Research Int.* 2014, vol. 21, no. 8, pp. 787–792.
- Pan Tao, Wang Xiaoyong, Su Hang, Yang Caifu. Effect of alloying element Al on hardenability and mechanical properties of micro-B treated ultra-heavy plate steels. *Acta Metallurgica Sinica*. 2014, vol. 50, no. 4, pp. 431–438.
- Wan Yong, Chen Weiqing. Effect of boron content on the microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2015, vol. 30, no. 3, pp. 574–579.
- Kyung Chul Choa, Dong Jun Mun, Yang Mo Koo, Jae Sang Lee. Effect of niobium and titanium addition on the hot ductility of boron containing steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 528, no. 10, pp. 3556–3561.
- Lopez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C., Bedolla-Jacuinde A., El-Wahabi M., Cabrera J.M. Hot flow behavior of boron microalloyed steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 480, no. 1-2, pp. 49–55.
- Stumpf W., Banks K. The hot working characteristics of a boron bearing and conventional low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 418, no. 1, pp. 86–94.
- Wang H., Zhang T., Zhu H., Li G., Yan Y., Wang J. Effect of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–706.
- Tekhnologicheskaya instruksiya TI SK-01 – 2007 "Vyplavka stali v kislorodnykh konverterakh"* [Technological instruction TI SK-01 – 2007 "Steel Smelting in Oxygen Converters"]. Temirtau: AO "ArselorMittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
- Tekhnologicheskaya instruksiya TI SK-07 – 2007 "Vnepechnaya obrabotka stali dlya slyabovykh MNLZ"* [Technological instruction TI SK-07 - 2007 "Out-of-furnace steel treatment for slab continuous casting machines"]. Temirtau: AO "ArselorMittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
- Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Akberdin A.A. etc. *Primenenie bora i ego soedineniy v metallurgii* [The use of Boron and Its Compounds in Metallurgy]. Novosibirsk: Akademizdat, 2018, 156 p. (In Russ.).

**Funding.** The work was financially supported by the RFBR grant No. 19-08-00825.

## Information about the authors:

**A.A. Babenko**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys (babenko251@gmail.com)

**V.I. Zhuchkov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys (ntm2000@mail.ru)

**A.A. Akberdin**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory "Boron" (akberdin\_38@mail.ru)

**A.V. Sychev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys

**A.S. Kim**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Head of the Laboratory "Boron" (boron\_213@mail.ru)

Received March 23, 2020

Revised July 6, 2020

Accepted July 6, 2020