

**МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ**

УДК 669.046.554

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160222

© Назюта Л.Ю.<sup>1</sup>, Цуркан М.Л.<sup>2</sup>, Тихонюк Л.С.<sup>3</sup>,  
Тарасенко О.С.<sup>4</sup>, Хавалиц Ю.В.<sup>5</sup>**ВЛИЯНИЕ БОРА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ РЯДОВОГО  
СОРТАМЕНТА**

Объект исследования – низколегированные борсодержащие конструкционные стали. Метод исследования – анализ влияния режима раскисления на степень усвоения бора и качество металла по данным статистической обработки плавов текущего производства. Цель работы – определение оптимальной степени раскисленности стали в контексте получения стабильных механических свойств готового металла. Проанализированы особенности производства борсодержащих сталей. Показано, что эффективность микролегирования бором зависит от технологии раскисления и наличия в технологическом цикле отделений термической обработки. В условиях ММК им. Ильича отсутствие отделений термической обработки для тонкого проката и ограниченная вариативность операций для толстого проката ограничивает возможность производства борсодержащих сталей. Проанализирована структура производства борсодержащих сталей за период 2016-2018 гг. Показано, что, в основном, это среднеуглеродистые конструкционные стали рядового сортамента, легированные марганцем и алюминием. В этот период в отсутствие современных средств внепечной обработки микролегирование бором (ФБ20, с размером кусков 10-50 мм) производят после полного раскисления металла в сталь ковше. При этом степень усвоения бора достаточно велика и составляет 77-92%. На примере стали А36 проанализированы основные механические свойства готового проката. Положительным влиянием бора на качество стали следует считать стабилизацию механических свойств в более узких пределах и возможность сокращения расхода алюминия на 8-10%. Оптимальным содержанием в металле кислоторастворимого алюминия следует считать 0,028-0,032%. Экономия алюминия позволит использовать для стабилизации показателей качества готового металла более сильные нитридообразующие элементы, например, титан.

**Ключевые слова:** борсодержащие стали, микролегирование, степень усвоения бора, предел текучести, предел сопротивления металла.

**Назюта Л.Ю., Цуркан М.Л., Тихонюк Л.С., Тарасенко О.С., Хавалиц Ю.В.**  
**Вплив бору на технологічні властивості середньовуглецевих конструкційних сталей рядового сортаменту.** Об'єкт дослідження – низьколеговані борвміщуючі конструкційні сталі. Метод дослідження – аналіз впливу режиму розкислення на ступінь засвоєння бору і якість металу за даними статистичної обробки плавов поточного виробництва. Мета роботи – визначення оптимального ступеня розки-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [Nazuta\\_L\\_u@pstu.edu](mailto:Nazuta_L_u@pstu.edu)

<sup>2</sup> директор по персоналу, ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь, [mikhail.tsurkan@metinvestholding.com](mailto:mikhail.tsurkan@metinvestholding.com)

<sup>3</sup> начальник технического отдела, ЧАО ММКИ ООО «Метинвест», г. Мариуполь

<sup>4</sup> начальник группы «Отдел прокатного производства», ЧАО ММКИ ООО «Метинвест», г. Мариуполь, [oleg.tarasenko@metinvestholding.com](mailto:oleg.tarasenko@metinvestholding.com)

<sup>5</sup> мастер производственного обучения, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [uliyal981havalic@gmail.com](mailto:uliyal981havalic@gmail.com)

слення сталі в контексті отримання стабільних механічних властивостей готового металу. Проаналізовано особливості виробництва борвміщуючих сталей. Показано, що ефективність мікролегування бором залежить від технології розкислення і наявності в технологічному циклі відділень термічної обробки. В умовах ММК ім. Ілліча відсутність відділень термічної обробки для тонкого прокату і обмежена варіативність операцій для товстого прокату обмежує можливість виробництва борвміщуючих сталей. Проаналізовано структуру виробництва борвміщуючих сталей за період 2016-2018 рр. Показано, що, в основному, це середньовуглецеві конструкційні сталі рядового сортаменту, леговані марганцем і алюмінієм. За відсутності сучасних засобів позапічної обробки мікролегування бором (ФБ20, із розміром кусків 10-50 мм) виконують після повного розкислення металу, при цьому ступінь засвоєння бору досить велика і складає 77-92%. На прикладі сталі А36 проаналізовано основні механічні властивості готового прокату. Позитивним впливом бору на якість сталі слід вважати стабілізацію механічних властивостей в більш вузьких межах і можливість скорочення витрат алюмінію на 8-10%. Оптимальним вмістом в металі кислоторозчиненого алюмінію слід вважати 0,028-0,032%. Економія алюмінію дозволить використовувати для стабілізації показників якості готового металу сильніші нітрідотворюючі елементи, наприклад, титан.

**Ключові слова:** борвміщуючі сталі, легування, ступінь засвоєння бору, межа плинності, межа опору металу.

*L.Yu. Nazyuta, M.L. Tsurkan, L.S. Tikhonyuk, O.S. Tarasenko, Yu.V. Khavalits. Boron effect on processing properties of middle-carbon structural steels of the common product range. The object of study is low-alloyed boron-containing structural steels. The research method is analysis of the deoxidation effect on the boron uptake degree and the quality of the metal according to the statistical processing of current production meltings. The objective is to determine the optimum degree of steel deoxidation in order to obtain stable mechanical properties of the finished metal. The distinguishing features of boron steels production have been analyzed. It has been shown that the efficiency of microalloying with boron depends on the deoxidation technology and heat treatment in the production cycle. Under Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol (MMKI) conditions, the absence of heat treatment departments for thin rolled products and the limited variability of operations for thick rolled products restricts the possibility of producing boron-containing steels. The structure of boron-containing steels production over the period from 2016 till 2018 has been analyzed. It has been shown that these are mainly medium-carbon structural steels of the common product range, alloyed with manganese and aluminum. In the absence of modern means of secondary treatment, boron microalloying (PB 20, lumps of 10-50 mm in size) is carried out after complete deoxidation of the metal, while the degree of boron absorption is quite substantial and amounts to 77-92%. Using A36 steel as an example, the basic mechanical properties of finished rolled products have been analyzed. The stabilization of mechanical properties within narrower limits and the possibility to reduce the aluminum consumption by 8-10% are considered to be the result of boron positive effect on the steel quality. The optimal content of acid-soluble aluminum in metal should be 0,028-0,032%. Saving aluminum will make it possible to use stronger nitride-forming elements such as titanium to stabilize the quality indicators of the finished metal.*

**Keywords:** boron-containing steel, microalloying, the degree of boron absorption, yield strength, metal resistance limit.

**Постановка проблеми.** В Україні доля борсодержащої сталі значительно ниже, чем за рубежом. Во многом это объясняется высокой долей экспортной составляющей в продукции отечественных предприятий и отсутствием практических данных о влиянии бора на технологические свойства низколегированных сталей массового сортамента.

Микролегирующие стали бором в условиях ЧАО ММКИ ООО «Метинвест» в период нестабильного экономического состояния Украины особенно актуально, т. к. ориентировано на внутренний рынок конструкционного металла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Микролегирующие бором является одним из наиболее перспективных направлений повышения качества металла. Это связано с механизмом влияния свободного бора или его соединений (карбида и нитрида бора) на качественные показатели стали [1-4].

При этом следует отметить, что микролегирующие бором конструкционных сталей рядового сортамента на предприятиях Метинвеста используется крайне редко. Одна из причин – стереотип мнений о механизме воздействия бора на качественные показатели металла.

Влияние бора на качественные показатели стали, как правило, связывают с образованием нитридов бора, которые имеют высокую температуру плавления ( $2730^{\circ}\text{C}$ ), а в углеродистой стали – с образованием карбидов бора, которые имеют не только высокую температуру плавления  $2345^{\circ}\text{C}$ , но и твердость. Карбиды бора относятся к очень прочным химическим соединениям и по твердости близки к алмазу.

Что касается оптимального содержания бора в стали ( $1\div 3\cdot 10^{-3}\%$ ), большинство авторов считают, что эффективность микролегирующего бором зависит от марки стали и технологии ее производства, в том числе структуры внепечной обработки в ККЦ и наличия отделений термической обработки в прокатных цехах.

На предприятиях Метинвеста, оборудованных современными средствами внепечной обработки УКП и VD (например, МК «Азовсталь») и отделениями для термической обработки металла, положительное влияние бора на качество стали проявляется более эффективно [4]. Отличительной особенностью ММК им. Ильича является отсутствие проведения операций термической обработки для горячего тонкого проката и ограниченная вариативность операций для толстого проката. Это уменьшает долю высококачественного металла в сортаменте стали.

**Цель работы** – расширение сортамента борсодержащих сталей и определение оптимальной степени раскисленности стали в контексте получения стабильных механических свойств готового металла.

**Изложение основного материала.** Анализ структуры производства борсодержащих сталей в условиях ММК им. Ильича за период 2016-2018 гг. ( $1,5-1,7\%$  от общего производства стали) показал, что значительное количество металла приходится на среднеуглеродистые конструкционные марки стали, легированные марганцем и алюминием. Микролегирующие бором производят по требованиям заказчика с целью оптимизации качественных характеристик (прочностных и пластических свойств) готового металла. Наиболее часто заказывают стали 3сп, А36 и St-44-2. Их доля в общем объеме выплавки борсодержащей стали в сумме составляет  $42,7\%$ , в том числе 3сп –  $22,6\%$ , А36 –  $11,9\%$ , St-44-2 –  $8,8\%$ . В таблице 1 представлен сравнительный химический анализ этих марок стали, а также некоторые характеристики (потребители, назначение, стандарты) их производства.

Сталь 3сп – конструкционная углеродистая обыкновенного качества, предназначена для несущих элементов сварных и несварных конструкций и деталей, работающих при положительных температурах; сталь А36 – низколегированная повышенной прочности, предназначена для производства проката, который используется для изготовления корпусов или других сварных конструкций; сталь St-44-2 – конструкционная углеродистая обыкновенного качества (аналог сталь Ст 4сп), предназначена для производства труб стальных сварных прецизионных.

Для анализа технико-экономической эффективности микролегирующего бором проанализированы по 10 плавов текущего производства указанных марок стали.

Выплавку стали производили в 160-т конвертерах согласно действующей технологической инструкции. Технология выплавки для указанных марок стали была примерно одинакова. На плавках использовали низкомарганцовистый чугуны с содержанием марганца  $0,12-0,16\%$  и кремния  $0,64-0,86\%$ . Расход чугуна составлял  $950-970$  кг/т стали, а его температура –  $1300-1345^{\circ}\text{C}$ . В шихте использовали лом стальной углеродистой ( $16-20\%$  от веса металлошихты) с расходом  $185-202$  кг/т стали. В зависимости от теплосодержания жидкого чугуна дополнительно в шихту вводили  $34-60$  кг/т стали скрапа (шлакового двора).

Продолжительность плавов составляла около 22 мин, расход кислорода –  $2,6-2,8$  м<sup>3</sup>/т ста-

ли. Для наведения шлака и проведения десульфурации в период продувки конвертер загружали 4,2-4,9 тонн доломитизированной извести СМД с содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 92\%$  (при содержании  $\text{MgO} = 22\%$ ). А также 5,4-5,9 тонн ИС-1 собственного производства или «МК «Азовсталь» с содержанием  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 92\%$  (в т. ч. содержанием  $\text{MgO} \leq 6\%$ ). Для разжижения шлака использовали 100-450 кг ставролита (брикеты ставролитовые ТУ 27.1-35340660-001.2009), содержащие (% масс.):  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30-40$ ;  $\text{SiO}_2 = 20-36$ ;  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 = 5-20\%$ ,  $\text{S} \leq 0,07\%$ .

Таблица 1

Сравнительный химический состав  
конструкционных борсодержащих сталей ЧАО «ММК им. Ильича»

Марка стали	Назначение	Потребители	Стандарты	Содержание, %								
				C, $\times 10^{-2}$	Si, $\times 10^{-2}$	Mn, $\times 10^{-2}$	S, $\times 10^{-3}$	P, $\times 10^{-3}$	B, $\times 10^{-3}$	Al <sub>общ.</sub> , $\times 10^{-3}$	Alк.р., $\times 10^{-3}$	N, $\times 10^{-3}$
Зсп	Конструкционная сталь, горячекатаный рулон	Украина и страны ближнего зарубежья	Стан 1700 ТТ-227-13-2015	15-16	20-21	48-54	9-17	14-25	1-2	26-37	22-34	5
A36	Конструкционная сталь, толщиной не более 20 мм	Страны ближнего Востока (Саудовская Аравия, Эмираты), Африка	Стан 3000 ASTM	19-20	19-22	53-60	8-13	14-19	0,9-1,1	20-35	15-32	5
St-44	Конструкционная сталь	Страны ближнего Востока (Иран, Ирак)	Стан 3000 DIN17100 EN100025	14-18	18-23	77-81	9-15	14-20	0,9-1,3	32-37	30-33	5

На повалке металл содержал (%): не более 0,1 С, 0,8-0,9 Мп, 0,013-0,016 S, 0,010-0,013 Р. Содержание FeO в конечном шлаке составляло 14-16%, основность шлака 3,4-3,8 единицы. Температура металла на повалке была относительно стабильной и составляла 1700°C. Это позволяло проводить операции раскисления и легирования металла в сталковше без использования химического подогрева.

При такой температуре равновесное содержание кислорода с углеродом должно составлять не менее 0,06-0,08%. Для стабилизации окисленности металла в период раскисления использовали уголь АС с расходом 1,1-1,2 кг/т стали.

Микролегирование бором производили в конце раскисления металла в сталковше. Металл продували аргоном в течение 20 минут. В качестве борсодержащего ферросплава использовали кусковой ФБ20 с размером кусков 10-50 мм. Удельный расход бора был практически одинаков и составлял 0,01 кг/т стали.

В таблице 2 представлен удельный расход элементов ферросплавов и степень усвоения бора на плавках указанного сортамента. О степени усвоения элементов раскислителей судили по их удельному расходу из расчета на 0,01% их усвоения металлом. Это позволило исключить влияние на этот показатель различных факторов, в том числе марок стали, состава металлошхты, технологии разлива (серийность МНЛЗ) и др. Во избежание этого, при расчете стандартной степени усвоения бора (%) делали поправку на средний выход жидкой стали в данной серии плавков.

Как следует из представленных данных, степень усвоения бора была достаточно велика и составляла в среднем для плавков стали Зсп – 83%, А36 – 77%, St-44-2 – 92%. Это достаточно высокие величины степени усвоения бора для кусковых ферросплавов. Наиболее низкая сте-

пень усвоения бора при производстве металла рядового сортамента была на плавках стали А36. Это связано с особенностями ее состава и технологии раскисления. При раскислении стали А36 удельные расходы основных раскислителей были значительно ниже, чем на других марках стали.

Таблица 2

Расход ферросплавов и степень усвоения бора при выплавке борсодержащих сталей общего назначения

Марка стали	Удельный расход элементов, кг/т стали (кг/0,01%)					Степень усвоения бора, %
	Mn	Si	Al	B	Уголь AC	
Зсп	5,0 (15,88)	3,01 (20,6)	1,73(84,15)	0,001 (12,05)	1,10	83
А36	4,42 (12,9)	2,65 (17,8)	1,39 (67,0)	0,011 (14,3)	1,25	77
St-44	8,2 (15,26)	2,42 (17,1)	1,62 (65,4)	0,011 (11,0)	0,94	92

Следует учитывать, что часть бора в металле, фиксируемого химическим анализом, находится в виде нитридов бора, которые могут оказать влияние на качественные показатели металла. Поэтому в дальнейшем было проанализировано влияние микролегирования бором на качественные показатели этого металла.

О качестве металла судили по следующим параметрам (на стане 3000): пределам текучести и сопротивления, относительному удлинению металла двухсот плавков текущего производства с микролегированием бором и без него. Сравнительные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3

Механические свойства марки стали А36

Показатель	Норма	Без микролегирования бором*	Микролегирование бором
Предел текучести, мин., ReH, МПа	250	290-364/340	290-358/325
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), мин., Rm, МПа	400-550	426-498/461	416-476/450
Относительное удлинение, мин., %	18	22-32/27	20-32/27

\* Числитель – минимум-максимум, знаменатель – среднее значение

Как следует из представленных данных, существенного влияния на механические свойства стали А36 микролегирование бором не оказывает (рис. 1-3). Средние показатели качества исследуемого металла (предел текучести и предел сопротивления) находились в пределах точности эксперимента.

Положительным влиянием бора на механические свойства стали А36 следует считать меньший разброс каждого из анализируемых показателей и большая стабильность их свойств. Возможно, это связано с расходом бора на образование нитридов. На опытном массиве плавков удельный расход алюминия и, особенно, содержание в готовом металле кислоторастворимого алюминия ( $Al_{кр}$ ) было на 8-10% выше, чем на сравнительных плавках без микролегирования бором.

При этом на сравнительном массиве плавков наблюдался более сильный разброс анализируемых параметров качества металла. Это объясняется нестабильностью содержания в нем кислоторастворимого алюминия ( $Al_{кр}$ ) (0,027-0,052%) и толщины проката (8-20 мм).

Контрольная выборка показателей качества борсодержащей стали при относительно стабильном содержании ( $Al_{кр}$ ) = 0,028-0,032% показала значительное улучшение исследуемых параметров качества. Это может явиться предпосылкой снижения содержания алюминия в сталях рядового сортамента, а также возможности использования для стабилизации показателей качества готового металла (за счет повышения растворимого бора) более сильных нитридообразу-

ющих элементов, например, титана. Оптимальное содержание алюминия и бора в готовом металле для каждой марки стали может быть определено эмпирическим путем.

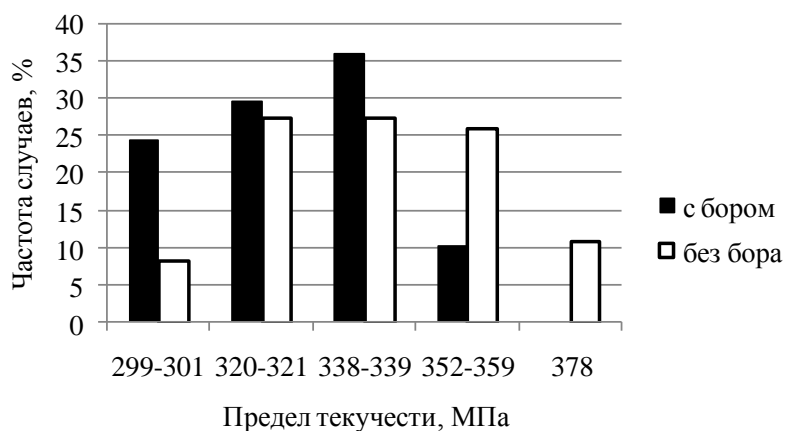


Рис. 1 – Влияние микролегирования бором на предел текучести стали А36

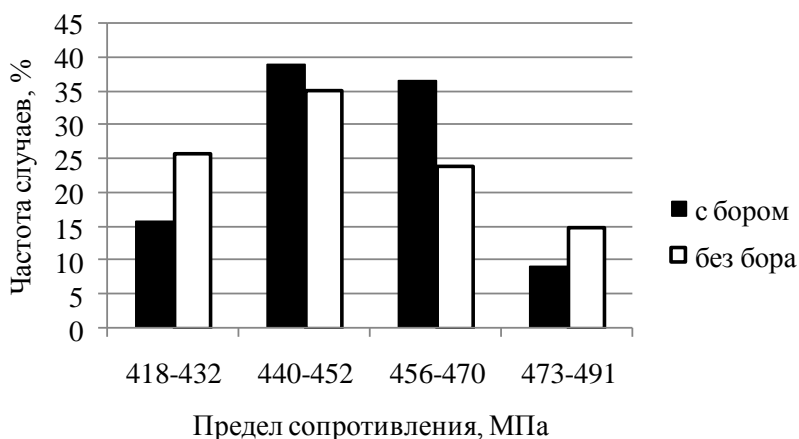


Рис. 2 – Влияние микролегирования бором на предел прочности стали А36

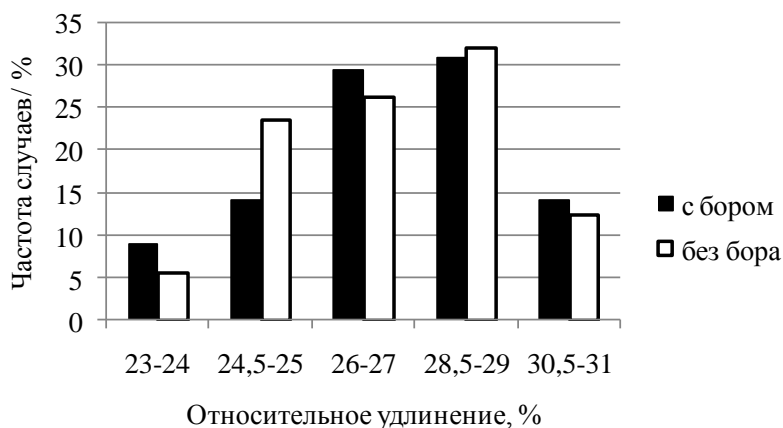


Рис. 3 – Влияние микролегирования бором на относительное удлинение стали А36

С ноября 2018 г. в конвертерном цехе ММК им. Ильича ведется масштабная реконструкция и модернизация основного технологического оборудования – ввод в эксплуатацию МНЛЗ №4 и УКП. Это может стать предпосылкой дальнейшего повышения степени усвоения бора.

**Выводы**

Проанализирована технология выплавки конструкционных борсодержащих сталей за период 2016-2018 гг. Микролегирование бором производят с целью оптимизации качественных характеристик (прочностных и пластических свойств) готового металла.

Показано, что при выплавке среднеуглеродистых сталей общего назначения микролегирование бором в условиях ММК им. Ильича не гарантирует повышение качественных показателей металла, однако стабилизирует их свойства и позволяет при прочих равных условиях сократить расход алюминия на 8-10%. Степень усвоения бора при использовании кускового ФБ20 с размером частиц 10-50 мм достаточно велика и составляет 77-92%.

Оптимальное содержание кислоторастворимого алюминия при выплавке борсодержащей конструкционной стали А36 составляет 0,028-0,032%.

**Список использованных источников:**

1. Лякишев И.П. Борсодержащие стали и сплавы / И.П. Лякишев, Ю.А. Плинер, С.И. Лаппо. – М. : Металлургия. – 1986. – 191 с.
2. Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1986. – 272 с.
3. 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. – № 2. – С. 15-17.
4. Особенности микролегирования бором при выплавке низколегированных конструкционных сталей / Л.Ю. Назюта, Л.С. Тихонюк, И.Н. Костыря, Ю.В. Хавалиц // Металл и литье Украины. – 2018. – № 3-4. – С. 46-55.

**References:**

1. Lyakishev I.P., Pliner Yu.A., Lappo S.I. *Borsoderzhashchiye stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 191 p. (Rus.)
2. Gol'dshteyn Ya.Ye., Mizin V.G. *Modifitsirovaniye i mikrolegirovaniye chuguna i stali* [Modification and microalloying of cast iron and steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 272 p. (Rus.)
3. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhigarev M.A. *Novoye primeneniye bora v metallurgii* [New use of boron in metallurgy]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova – Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2005, no. 2, pp. 15-17. (Rus.)
4. Nazyuta L.Yu., Tikhonyuk L.S., Kostyrya I.N., Khavalits Yu.V. *Osobennosti mikrolegirovaniya borom pri vyplavke nizkolegirovannykh konstruktsionnykh staley* [Features of boron microalloying in smelting low-alloyed structural steels]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2018, no. 3-4, pp. 46-55. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.09.2018