

УДК 669.046.554

© Назюта Л.Ю.¹, Федорова Е.В.², Хавалиц Ю.В.³**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТЕПЕНЬ
УСВОЕНИЯ БОРА ПРИ ВЫПЛАВКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Объект исследования: технология микролегирования бором низколегированных конструкционных сталей. Метод исследования: анализ степени усвоения бора по данным статистической обработки плавов текущего производства. Цель работы: определение оптимального режима внепечной обработки с целью получения максимальной степени усвоения бора. Проанализированы технические и экономические преимущества микролегирования конструкционной стали бором. Показано, что благотворное влияние бора на технические характеристики (прежде всего на прокаливаемость) обусловлено особенностями строения атомов бора и проявляются только в сталях, прошедших термомеханическую обработку. Способность интенсивно изменять структуру металла является предпосылкой снижения в них содержания никеля, молибдена и других легирующих элементов. Проанализированы динамика и структура производства борсодержащих сталей, рассмотрена существующая технология микролегирования бором основных марок стали. На примере стали А514В изучено влияние степени раскисленности металла и расхода титана на удельный расход и степень усвоения бора. Показано, что использование современных средств внепечной обработки (агрегата ковш-печь – УКП и вакууматоров VD) позволяет повысить степень усвоения бора и, соответственно, качество металла.

Ключевые слова: борсодержащая сталь, раскисление, модифицирование, микролегирование, степень усвоения.

Назюта Л.Ю., Федорова О.В., Хавалиц Ю.В. Вплив режиму позапічної обробки на рівень засвоєння бору при виплавці низьколегованих конструкційних сталей.

Об'єкт дослідження: технологія мікролегуювання бором низьколегованих конструкційних сталей. Метод дослідження: аналіз ступеня засвоєння бору за даними статистичної обробки плавов поточного виробництва. Мета роботи: визначення оптимального режиму позапічної обробки з метою отримання максимального ступеня засвоєння бору. Проаналізовано технічні та економічні переваги мікролегуювання конструкційної сталі бором. Показано, що благотворний вплив бору на технічні характеристики (перш за все на прогартуваність) обумовлено особливостями будови атомів бору і проявляються лише в сталях, що пройшли термомеханічну обробку. Здатність інтенсивно змінювати структуру металу є передумовою зниження в них вмісту нікелю, молибдену та інших легуючих елементів. Проаналізовано динаміку та структуру виробництва борвмісних сталей, розглянута існуюча технологія мікролегуювання бором основних марок сталі. На прикладі сталі А514В вивчено вплив ступеня розкислення металу і витрати титану на питому витрату і ступінь засвоєння бору. Показано, що використання сучасних засобів позапічної обробки (агрегату ківш-піч - УКП та вакууматора VD) дозволяє підвищити ступінь засвоєння бору і, відповідно, якість металу.

Ключові слова: борвмісна сталь, розкислення, модифікування, легування, ступінь засвоєння.

L.Yu. Nazuta, O.V. Fedorova, Y.V. Khavalits. Influence of the extraction treatment on

¹ д-р техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Nazuta_l_u@pstu.edu

² астирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ мастер произв. обучения, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, uliyal1981havalic@gmail.com

the level of boron absorption during the smelting of low-alloy structural steels. Object of investigation: Low-alloyed structural steels microalloying with boron technology. Method of investigation: analysis of boron assimilation degree from the statistical analysis of the smelting of the current production. Purpose: determination of the optimal mode of out-of-furnace treatment in order to obtain the maximum degree of boron assimilation. Technical and economic advantages of structural steel microalloying with boron have been analyzed. It has been shown that the beneficial effect of boron on technical characteristics (primarily on hardenability) is due to the peculiarities of the structure of boron atoms and shows itself only in steels subjected to thermomechanical processing. The ability to intensively change the structure of a metal is a prerequisite for reducing the content of nickel, molybdenum and other alloying elements in them. The dynamics and structure of boron-containing steels production have been analyzed, the main steel grades microalloying with boron has been considered. The influence of the degree of metal deoxidation and the titanium consumption on the boron specific consumption and assimilation degree has been studied using the A514B steel as an example. It has been shown that modern out-of-furnace tools (ladle furnace-UKP unit and VD vacuumers) make it possible to increase boron assimilation and, consequently, metal quality.

Keywords: boron-containing steel, deoxidation, modification, microalloying, assimilation degree.

Постановка проблеми. За рубежом при производстве конструкционных низколегированных сталей бор применяют в качестве одной из наиболее часто используемых микролегирующих добавок, обеспечивающих оптимальный комплекс технических характеристик без дополнительных затрат. В некоторых странах объем производства таких сталей составляет более 40%.

В Украине производство борсодержащих сталей сосредоточено на предприятиях Метинвеста и не превышает 2% от общего выпуска продукции. Одной из причин сдерживания производства борсодержащих сталей является отсутствие эффективной технологии микролегирования и нестабильное содержание бора из-за низкой степени его усвоения.

Анализ последних исследований и публикаций. Использование бора, наряду с другими микролегирующими элементами, открывает широкие возможности для получения экономнолегированных сталей, эксплуатационные характеристики которых во многих случаях не только не уступают, но и превосходят уровень свойств сталей, получаемых с применением традиционной системы легирования [1-4].

В настоящее время нет четкой общепризнанной теории, которая могла бы объяснить механизм влияния бора на качественные показатели металла. Многие ученые расценивают бор как интенсификатор (модификатор) влияния других элементов на качественные показатели металла, а не как самостоятельно легирующий элемент. В отечественной и зарубежной литературе это влияние связывают с системой легирования. Для разных типов сталей и систем легирования влияние бора различно и объясняется особенностями строения атомов бора. При этом практически все исследователи подчеркивают, что благотворное влияние бора на технические характеристики (прежде всего на прокаливаемость) проявляются только в сталях, прошедших термомеханическую обработку.

Следует отметить, что положительное влияние бора, как микролегирующей добавки, реализуется только за счет растворенного бора, а не в составе неметаллических включений. Влияние бора связано с его высокой поверхностной активностью и способностью образовывать твердый раствор внедрения.

В процессах термомеханической обработки введение бора способствует снижению химической неоднородности, измельчению столбчатых кристаллов в непрерывнолитой заготовке и формированию мелкодисперсной структуры, а также ослаблению процесса старения. Способность интенсивно изменять структуру металла при ускоренном охлаждении металла делает бор обязательным компонентом многих высокопрочных низколегированных сталей и является предпосылкой снижения в них содержания никеля, молибдена и других легирующих элементов. Для большинства легирующих элементов положительное влияние на свойства стали пропорционально количеству вводимой добавки. Бор же существенно повышает качество металла уже при введении его в количестве 10^{-4} - $10^{-3}\%$. При таких содержаниях влияние бора на прока-

ливаемость и вязкость низко- и среднелегированных сталей соответствует эффекту легирования хромом, марганцем, молибденом или никелем с содержанием их в 100-300 раз большем добавок бора [2].

Цель работы – определение оптимального режима внепечной обработки с целью получения максимальной степени усвоения бора.

Изложение основного материала. В работах [5-11] обобщен опыт микролегирования бором низколегированных малоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей. Показано, что проблема получения качественных борсодержащих сталей должна решаться за счет правильной технологии раскисления. Бор легко окисляется и связывает в нитриды даже малыми остаточными концентрациями в металле кислорода и азота. Поэтому микролегирование бором осуществляют на заключительных этапах внепечного рафинирования после обработки сильными раскислителями и деазотирующими элементами.

Высокая эффективность микролегирования бором достигается при предварительном раскислении металла алюминием и титаном, который является более сильным нитридообразующим элементом. При этом необходимо точно дозировать расход титана. Считают, что при производстве борсодержащих сталей необходимо обеспечивать минимальное содержание бора (0,0008-0,002%) и титана (0,015-0,03%) [4]. Хорошие результаты дает совместное микролегирование стали бором, алюминием и кальцием (карбидом кальция). Применение кальция, обладающего более высокой раскислительной способностью, позволяет получить в процессе микролегирования оптимальную окисленность металла, сократить расход алюминия и, соответственно, повысить чистоту стали по неметаллическим включениям [6].

Основная задача при производстве борсодержащих сталей – получение стабильного содержания активного (свободного) бора в расплаве. Вместе с тем, добиться требуемых стабильных содержаний бора из-за его высокой реакционной способности к растворенным в металле кислороду и азоту достаточно сложно. Кроме того, в процессе кристаллизации активность (раскислительная способность) бора повышается. Чтобы исключить влияние вторичного окисления металла в процессе непрерывной разливки стали, следует иметь в жидком металле избыточное содержание компонентов, имеющих более высокую активность по отношению к этим элементам.

Значительное влияние на качество стали оказывает состав борсодержащих материалов. Основной борсодержащий легирующий материал – ферробор (ФБ) с содержанием бора 15-20%. Учитывая значительный угар бора (50-60%), рекомендуют его вводить в составе комплексных лигатур, содержащих сильные раскислители (Al, Ti, ЦЗМ), которые не только защищают бор от угара, но и, переходя в металл, влияют на процесс кристаллизации и свойства стали [4]. К сожалению, высокая стоимость таких ферросплавов и их доступность не позволяет украинским предприятиям их использовать.

За рубежом разработаны технологии микролегирования бором, которые позволяют получить стабильно высокую степень усвоения бора на уровне 80-90% за счет изменения технологии раскисления и использования современных способов внепечной обработки [9].

Научный и практический интерес представляет опыт МК «Азовсталь» по освоению технологии производства низколегированных борсодержащих сталей. Одной из первых на комбинате была освоена технология производства низколегированной конструкционной стали А514В (аналог 20ГХМФТР) следующего химического состава (массовая доля, %): 0,12-0,21 С; 0,70-1,00 Mn, 0,2-0,35 Si, $\leq 0,0035$ S, $\leq 0,0035$ P, 0,4-0,6 Cr, 0,15-0,25 Mo, 0,03-0,08 V, 0,01-0,03 Ti, 0,0005-0,005 В. Стандарт регламентировал механические характеристики в следующих пределах: $\sigma_B = 760-895$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 690$ МПа, $\delta_5 \geq 18\%$, $\psi \geq (40-50)\%$.

За период 1993-1998 г.г. на комбинате выплавлено более 100 тыс. т стали А514В. Технология производства этой стали предусматривала выплавку полупродукта в 350-т конвертерах верхнего дутья, внепечную обработку на УКДС, разливку на МНЛЗ, а затем нормализацию с последующей термической обработкой в проходных печах [10-11].

Раскисление металла и микролегирования бором (ФБ-20) производили на выпуске металла в ковше совместно с обработкой синтетическим шлаком (или ТШС). В этих условиях степень усвоения бора не превышала 20%.

С целью предотвращения окисления бора и, соответственно, повышения степени его усвоения до 50% было рекомендовано уменьшить содержание азота до 0,008%, увеличить содержание бора до 0,003%, а также повысить содержание в стали алюминия и титана до 0,05-0,06%

и 0,025-0,030% соответственно. По мнению разработчиков этой технологии, массовое производство борсодержащих сталей в этот период сдерживалось рядом технологических трудностей, в том числе отсутствием современных средств внепечной обработки, а также необходимостью предотвращения связывания бора в нитриды.

С внедрением на комбинате современной технологии внепечной обработки на агрегате печь-ковш и вакууматоре (VD), которая позволяет снизить в конечном металле содержание кислорода и азота (за счет понижения температуры на повалке), эта задача легко решается за счет совместного микролегирования бором и нитридообразующими элементами алюминием и титаном, которые имеют относительно высокую реакционную способность.

В 2012 г. выплавлено около 70 тыс. т борсодержащей стали (1,5% от общего производства). В дальнейшем производство сократилось до 14-15 тыс. т в 2015-2016 г.г. Это связано с изменением сортамента стали, в котором доля высококачественного металла постепенно снижается, а также с дефицитом борсодержащих ферросплавов, поставка которых в настоящее время осуществляется из Китая.

Анализ сортамента борсодержащих сталей за исследуемый период показал, что микролегирование бором, как правило, используют для производства низколегированных марганцовистых конструкционных сталей, содержащих около 0,2-0,3% С и 1,0-1,2% Mn, с целью повышения их жаропрочности (в результате упрочнения границ зерен боридами) и экономии основных легирующих.

В таблице представлены некоторые технико-экономические показатели, системы легирования, особенности микролегирования бором основных типов борсодержащих сталей, в том числе легированных никелем (70MTLTV), хромом (Z092 и 25X2ГСБ) и хромом и молибденом (A514B и 16X2ГСБ), а также наиболее качественная сталь для сварных конструкций, легированная хромом, никелем и молибденом (S690QL).

Таблица

Характеристики наиболее востребованных борсодержащих (низколегированные Mn-содержащие конструкционные) сталей

1. Марка стали	70MTLTV	S690QL	A514	Z092	16X2ГСБ	25X2ГСБ
2. Система легирования	Mn, Ni, Nb, Ca, B	Mn, Cr, Ni, Mo, Ti, V, Ca, B	Mn, Cr, Mo, Ti, V, Ca, B	Mn, Cr, Ca, B	Mn, Cr, Mo, Ti, V, Ca, B	Mn, Cr, Ti, V, B
3. Содержание в готовом металле, %						
N	<0,006	<0,007	<0,006	0,006	0,007	0,006
B	0,001	0,0013	0,001	0,002	0,001	0,0018
Ti	<0,005	0,015	0,015	<0,005	0,016	0,024
Ca	0,0024	0,0018	0,0022	0,0015	0,0011	0,0006
Алк.р.	0,027	0,032	0,034	0,034	0,035	0,032
4. Расход бора, %						
кг/0,01%	68,83	31,8	31,05	59,14	77,2	34,44
кг/т стали	0,02	0,012	0,009	0,037	0,021	0,020
Степень усвоения B, %	50	92	90	56,4	57	90
5. Период микролегирования бором	В конце рафинирования на АКП, совместно с Al и Ca	На VD совместно с Al, Ti и Ca	На АКП за 30 сек до ввода последней порции AL, Ti и Ca	На VD совместно с Al и Ca	В конце рафинирования на АКП, совместно с Ti и Ca (без Al)	В конце рафинирования на АКП, совместно с Al и Ti

Металл предназначен для изготовления сварочных конструкций, сосудов, работающих под давлением, а также деталей, подвергающихся сильному износу. Основные потребители борсодержащих сталей машиностроительные предприятия Украины, Италии, Египта, США. Технология выплавки этих сталей была примерно одинакова. На плавках использовали 280-290 т передельного низкомарганцовистого чугуна, содержащего (масс. %): 0,1-0,2 Mn, 05-08 Si, 0,015-0,030 S. Температура чугуна 1290-1330°C. Расход лома на плавках был примерно одина-

ков и составлял, в среднем, 25,2% от массы металлошихты. Совместно с ломом загружали никель и ферромolibден. Плавки вели с передувом. С целью снижения окисленности ванны в период продувки применяли уголь АО в количестве 2,5-12 кг/т стали. Продолжительность продувки составляла 15-18 мин, расход кислорода – 18-20 тыс. куб. м. На выпуске металл содержал 0,04-0,06% С и 0,05-0,06% Mn. Температура металла на сливе из конвертера составляла 1600-1620°C. В шлаке содержалось 16-18% окислов железа. Окисленность металла – 0,06-0,08%.

Основную массу раскислителей вводили в сталеразливочный ковш (СК) с донной продувкой аргоном. Окончательное раскисление, микролегирование и модифицирование металла производили на установке ковш-печь (УКП) на заключительных этапах рафинирования, на некоторых марках стали (Z092 и S690QL) – в период вакуумирования.

Выборочно (по 5 плавков каждой марки) определяли степень усвоения бора и удельный расход некоторых раскислителей. Об окисленности металла в период кристаллизации судили по содержанию в нем кислоторастворимого алюминия $[Al_{кр}]$, кальция и титана.

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 металлошихты, технологии разлива (серийность МНЛЗ) и др. Во избежание этого, при расчете стандартной степени усвоения бора и титана (%) делали поправку на средний выход жидкой стали в данной серии плавков [12].

Ниже приведены особенности микролегирования анализируемых марок стали.

Как следует из представленных данных, на плавках стали S690QL, A514B и 25X2ГСБ микролегирование бором осуществлялось совместно с титаном, алюминием и кальцием. Степень усвоения бора составляла более 90%. Остаточное содержание $[Al_{кр}]$ и $[Ti]$ составляло 0,034 и 0,015%, соответственно.

При производстве стали 70MTLV и Z092 без микролегирования титаном, несмотря на относительно высокий расход алюминия (0,027% и 0,034%, соответственно), степень усвоения бора была почти в 2 раза меньше.

На плавках стали 16X2ГСБ, в которых микролегирования бором и титаном осуществлялась без одновременного раскисления алюминием, несмотря на высокий $[Al_{кр}]$, степень усвоения бора была также невелика. По нашему мнению, это связано с повышенной жидкотекучестью шлака в период доводки на АКП. Расход плавикового шпата на этих плавках составлял 2,6 кг/т и был почти в 4 раза больше, чем на плавках стали 25X2ГСБ, на которых расход плавикового шпата составил 0,51 кг.

Негативное влияние высокой жидкотекучести шлака явилось причиной и более низкой степени усвоения бора на плавках стали 70MTLV и Z092, в период доводки которых использовали также значительное количество плавикового шпата (1,3-1,2 кг/т стали).

Согласно существующей технологии микролегирования кусковой ФБ вводится в металл сверху. При этом шлаковая фаза оказывала значительное влияние на его усвоение.

Предварительный анализ показал необходимость корректирования технологии раскисления и микролегирования борсодержащих сталей.

Отработку режимов микролегирования бором производили на основании данных 25 плавков стали A514B. Более подробно технология производства этой стали освещена в работе [12]. Ввод ферробора (ФБ20 с размером кусков 10-50 мм) производили после полного раскисления металла алюминием совместно с более сильными нитридообразующими элементами – титаном и кальцием.

Было установлено, что в зависимости от степени раскисления металла степень усвоения бора колеблется в широких пределах – 58-98%. На рисунке показано влияние кислоторастворимого алюминия на степень усвоения бора при микролегировании стали A514B. Наиболее высокая степень усвоения бора отмечалась при плавках, в металле которых остаточное содержание кислоторастворимого алюминия составляло не менее 0,034%. Это почти в два раза меньше ранее рекомендуемых значений при освоении этой стали без использования современных средств внепечной обработки [10-11].

При определении расхода нитридообразующих элементов, которые повышают степень усвоения бора, были проанализированы различные режимы внепечной обработки указанных марок стали текущего производства, в которых содержание азота составляло 0,006-0,007%. Всего было обработано более 50 плавков текущего производства. Рекомендуемое содержание

титана в готовой стали должно быть более 0,015%.

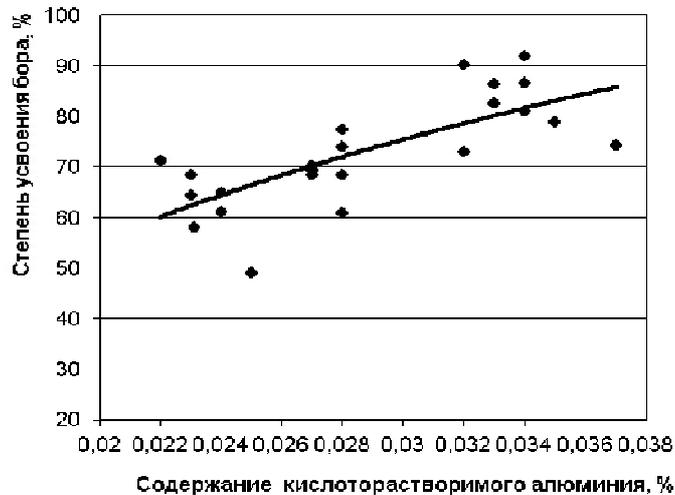


Рисунок – Влияние раскисленности ванны на степень усвоения бора

На основе полученных результатов могут быть скорректированы режимы выпечки других типов борсодержащих сталей, в том числе уточнены расходы и последовательность микролегирования металла алюминием, титаном и бором.

Выводы

Разработана и внедрена технология микролегирования стали бором низколегированной конструкционной стали, позволяющая получить стабильно высокую степень его усвоения на уровне 80-90%.

Для увеличения степени усвоения бора при его содержании в готовом металле 0,001-0,002% микролегирование ферробором следует осуществлять в конце рафинирования на УКП совместно с алюминием и титаном. При этом остаточное содержание этих элементов в металле должно составлять не менее 0,034 и 0,015%, соответственно.

Предлагаемая технология позволяет сократить расход раскислителей и легирующих при сохранении качественных показателей стали.

Значительное влияние на эффективность микролегирования бором оказывает физическое состояние покровного шлака. Следует избегать формирования жидкоподвижных шлаков на основе плавикового шпата.

Список использованных источников:

1. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугунах и сталях / под ред. С.М. Винарова. – М. : Металлургиздат, 1961. – 174 с.
2. Лякишев И.П. Борсодержащие стали и сплавы / И.П. Лякишев, Ю.А. Плинер, С.И. Лаппо. – М. : Металлургия. – 1986. – 191 с.
3. Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Особенности микролегирования стали бором и новым материалом-боридом ферротитана / И.Р. Манашев [и др.] // Сталь. – 2009. – № 10. – С. 34-38.
5. Потапов А.И. Технологические особенности легирования стали бором / А.И. Потапов, А.Е. Семин // Известия вузов ЧМ. – 2012. – № 9. – С. 68-69.
6. Исследование и разработка комплексной технологии производства низкоуглеродистой борсодержащей стали с низким содержанием серы / А.А. Бабенко [и др.] // Сталь. – 2015. – № 11. – С. 48-50.
7. Богданов И.А. Разработка и освоение бор содержащих сталей / И.А. Богданов, Л.Б. Сычков, И.В. Деревянченко // Металлург. – 1999. – № 2. – С. 29-30.
8. Ярошевская Е.С. Повышение степени усвоения титана и бора / Е.С. Ярошевская, С.В. Бы-

- ковский, В.Б. Морозов // Сталь. – 1992. – № 8. – С. 26-29.
9. Зорин А.И. Производство борсодержащих марок стали / А.И. Зорин, А.Л. Подкопытов, В.Б. Захаров // *Металлург.* – 2005. – № 5. – С. 17-20.
 10. Освоение производства термоулучшенного листа толщиной до 40 мм из высокопрочной борсодержащей стали типа 20ХГМФТР с гарантированным комплексом и др. / М.В. Бобылев [и др.] // *Металл и литье Украины.* – 1998. – № 7-8. – С. 6-8.
 11. Повышение эффективности легирования бором стали для термоулучшенных толстых листов производства ОАО «МК «Азовсталь» / М.В. Бобылев [и др.] // *Сталь.* – 1998. – № 4. – С. 55-57.
 12. Назюта Л.Ю. Влияние технологии раскисления на степень усвоения титана при выплавке низколегированных сталей / Л.Ю. Назюта, М.П. Орличенко, И.Н. Костыря // *Черная металлургия.* – 2016. – № 8. – С. 47-52.

References:

1. Vinarov S.M. *Bor, kal'tsiy, niobiy i tsirkoniy v chugune i stali* [Boron, calcium, niobium and zirconium in cast iron and steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 174 p. (Rus.)
2. 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.)
3. 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.)
4. Manashev I.R., Shatokhin IM, Ziatdinov M.Kh., Bigeyev V.A. Osobennosti mikrolegirovaniya stali borom i novym materialom-boridom ferrotitana [Features of microalloying of boron steel and a new material-boride of ferrotitanium]. *Stal' – Steel*, 2009. no.10, pp. 34-38. (Rus.)
5. Potapov A.Y., Semyn A.E. *Tekhnologicheskyye osobennosti lehyrovaniya staly borom* [Technological features of doping became boron]. Moscow, Yzvestiya vuzov CHM Publ., 2012, no.9, pp. 68-69. (Rus.)
6. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Akberdin A.A., Kim A.S., Vitushhenko M.F., Dobromilov A.A. Yssledovaniye u razrabotka kompleksnoy tekhnolohyy proizvodstva nyzkouglerodystoy borsoderzhashchey staly s nyzkym sodержanyem sery [Research and development of a complex technology of production of low-carbon borosodium steel with low sulfur content]. *Stal' – Steel*, 2015, no.11, pp. 48-50. (Rus.)
7. Bogdanov I.A., Sychkov L.B., Derevyanchenko I.V. *Razrabotka i osvoyeniye bor sodержashchikh staley* [Development and development of boron-containing steels]. Moscow, Metallurg Publ., 1999, no.2, pp. 29-30. (Rus.)
8. Yaroshevskaya Ye.S., Bykovskiy S.V., Morozov V.B. *Povysheniye stepeni usvoyeniya titana i bora* [Increase in the absorption of titanium and boron]. Moscow, *Stal'* Publ., 1992. no.8, pp. 26-29. (Rus.)
9. Zorin A.I., Podkopytov A.L., Zakharov V.B. *Proizvodstvo borsoderzhashchikh marok stali* [Production of boron-bearing steel grades]. *Metallurg – Metallurgist*, 2005, no.7-8, pp. 17-20. (Rus.)
10. Bobylev M.V., Kurdyukov A.A., Nosochenko O.V., Mel'nik S.G. Osvoeniye proizvodstva termouluchshennogo lista tolshchinoy do 40 mm iz vysokoprochnoy borsoderzhashchey stali tipa 20KHGMFTR s garantirovannym kompleksom [Mastering the production of heat-treated sheet thickness of up to 40 mm from high-strength boron-containing steel type 20ХГМФТР with guaranteed complex, etc.]. *Stal' – Steel*, 1998, no.7-8, pp. 6-8. (Rus.)
11. Bobylev M.V., Kurdyukov A.A., Nosochenko O.V., Mel'nik S.G. Povysheniye effektivnosti legirovaniya borom stali dlya termouluchshennykh tol-stykh listov proizvodstva ОАО «МК «Азовсталь» [Increasing the efficiency of alloying with boron steel for thermally improved thick sheets produced by JSC «МК «Азовсталь»]. *Stal' – Steel*, 1998, no.4, pp. 55-57. (Rus.)
12. Nazyuta L.Yu., Orlichenko M.P., Kostyrya I.N. Vliyaniye tekhnologii raskisleniya na stepen' usvoyeniya titana pri vyplavke nizkolegированных staley [Influence of technology of deoxidation on the degree of mastering of titanium in smelting low-alloy steels]. *Chernaya metallurgiya – Ferrous metallurgy*, 2016, no.8, pp. 47-52. (Rus.)

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

Статья поступила 15.09.2017