

УДК 669.046.554

© Назюта Л.Ю.¹, Федорова Е.В.², Хавалиц Ю.В.³**К ВОПРОСУ О РАСКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ БОРА И ЕЕ
ВЛИЯНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЮ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ**

Объект исследования – борсодержащие стали. Метод исследования: анализ термодинамики раскисления в системе Fe-B-O. Цель работы: выбор наиболее достоверных значений констант раскисления железа бором, на основании этого разработка наиболее эффективных технологий микролегирувания бором. В работе на основании данных теоретических и экспериментальных исследований различных авторов проанализирован механизм раскисления железа бором в диапазонах 0,001-0,01%. Показано, что независимо от содержания бора в расплаве Fe-B-O образуется оксид бора B_2O_3 . Показано, что данные термодинамических расчетов и экспериментальных исследований различных авторов (независимо от методики их расчетов) отличаются незначительно. При температуре 1600°C величина констант раскисления по данным различных авторов относительно стабильна и составляет $K_{B-O}^{-1} = (0,36-0,46) \cdot 10^8$. Для практических расчетов следует рекомендовать работу И.С. Куликова. Влияние бора на активность кислорода относительно мало. При содержании бора менее 0,1% в случае образования B_2O_3 параметр взаимодействия составит $e_O^B = -(0,39-0,40)$. Влияние бора на собственную активность оценивается коэффициентом $e_B^B = 0,065+0,01[V]$. Изучен механизм и особенности микролегирувание бором, влияние бора на эксплуатационные свойства стали за счет изменения структуры в процессе кристаллизации и термической обработки. Рассмотрена практика микролегирувания бором, технология внепечной обработки, в том числе совместный ввод с сильными раскислителями – алюминием и кальцием.

Ключевые слова: бор, раскисление, окисленность, константа раскисления, параметры взаимодействия, микролегирувание, модифицирование.

Назюта Л.Ю., Федорова О.В., Хавалиц Ю.В. До питання щодо розкислювальної здатності бора та її впливу на технологію мікролегування. Об'єкт дослідження – боровміщуючі сталі. Метод дослідження: аналіз термодинаміки розкислення в системі Fe-B-O. Мета роботи: вибір найбільш достовірних значень констант розкислення заліза бором, на підставі цього розробка найбільш ефективних технологій мікролегування бором. У роботі на підставі даних теоретичних і експериментальних досліджень різних авторів проаналізовано механізм розкислення заліза бором у діапазонах 0,001-0,01%. Показано, що незалежно від вмісту бора в розплаві Fe-B-O утворюється оксид бора B_2O_3 . Показано, що дані термодинамічних розрахунків і експериментальних досліджень різних авторів (незалежно від методики їх розрахунків) відрізняються незначно. При температурі 1600 °C величина констант розкислення за даними різних авторів відносно стабільна та становить $K_{B-O}^{-1} = (0,36-0,46) \cdot 10^8$. Для практичних розрахунків слід рекомендувати роботу І.С. Куликова. Вплив бора на активність кисню відносно малий. При вмісті бора менше 0,1% у випадку утворення B_2O_3 параметр взаємодії складе $e_O^B = -(0,39-0,40)$.

Вплив бора на власну активність оцінюється коефіцієнтом $e_B^B = 0,065+0,01[V]$. Вивчено механізм і особливості мікролегування бором, вплив бору на експлуатацій-

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

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

³ мастер произв. обучения, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, uliyva1981havalic@gmail.com

ні властивості сталі за рахунок зміни структури в процесі кристалізації та термічної обробки. Розглянуто практику мікролегування бором, технологію позапічної обробки, у тому числі спільне введення з сильними розкислювачами – алюмінієм і кальцієм.

Ключові слова: бор, розкислення, окислення, константа розкислення, параметри взаємодії, мікролегування, модифікування.

L.Yu. Nazuta, O.V. Fedorova, Y.V. Khavalits. On the problem of boron deoxidation and its effect on microalloying. Object of research: boron-containing steels. Method of study: analysis of deoxidation thermodynamics in the Fe-B-O system. Purpose: The choice of the most reliable constant values of iron deoxidation with boron as well as on the basis of this, the development of the most effective technologies of microalloying with boron. In the work on the basis of theoretical and experimental data got by various authors, the iron deoxidation with boron over the range 0,001% to 0,01% is analyzed. It is shown that boron oxide B_2O_3 forms independently of the boron content in the Fe-B-O melt. It is shown that the data of thermodynamic calculations and experimental researches by different authors (irrespective of the method of their calculations) differ just slightly. At 1600°C, the value of the deoxidation constants according to the data got by various authors is relatively stable and is: $K_{B-O}^{-1} = (0,36-0,46) \cdot 10^{-8}$. For practical calculations the work of I.S. Kulikova should be recommended. The effect of boron on the oxygen activity is relatively low. With boron content of less than 0,1% in case of B_2O_3 , formation the interaction parameter will be $e_O^B = -(0,39-0,40)$. The effect of boron on its own activity is estimated by the coefficient $e_B^B = 0,065 + 0,01[B]$. The microalloying with boron as well as its peculiarities have been studied. Boron influence on the operational properties of steel due to structural changes during crystallization and heat treatment have been studied. The practice of microalloying with boron, technology of out-of-furnace treatment, including joint doping with strong deoxidizers aluminum and calcium, has been considered.

Keywords: boron, deoxidation, oxidation, deoxidation constant, interaction parameters, microalloying, modification.

Постановка проблеми. Основной задачей современной металлургии является снижение материало- и энергоёмкости стали. Значительный интерес вызывают экономнолегированные чистые стали с регулируемым содержанием неметаллических включений, а также технологии их получения в конвертерах верхнего дутья. Бор является наиболее перспективным микролегирующим элементом, который позволяет сократить расход традиционных легирующих при сохранении качественных показателей стали. Раскислительной способности бора и технологии микролегирования бором и посвящена данная статья.

Анализ последних исследований и публикаций. Бор – один из наиболее востребованных в металлургии элементов, который применяется для микролегирования и модифицирования стали. Бор – элемент III группы периодической системы элементов (ПСЭ); порядковый номер – 5; атомная масса – 10,811 г/см³; валентность – 3; температура плавления бора – 2180°C, кипения – 3700°C; электронная конфигурация атома бора $1S^22S^22P^1$; относится к группе полупроводников.

Согласно анализу [1-4] в отечественной и зарубежной металлургии микролегирование (модифицирование) бором используется при производстве специальных сталей (для повышения их технологических и служебных характеристик), при производстве углеродистой стали (для повышения прокаливаемости без применения дорогих микролегирующих элементов); в производстве низколегируемых конструкционных сталей с целью экономии более дорогих легирующих элементов (Mo, Ni, Cr) без ухудшения механических и служебных свойств.

Особый интерес вызывает влияние бора на структуру особо-низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,02-0,03% [5].

В настоящее время нет единых взглядов на механизм воздействия бора на эксплуатационные характеристики стали. По мнению большинства исследователей основной отличитель-

ной способностью бора является высокая поверхностная активность и, соответственно, способность влиять на размер и состояние границ зерна.

При добавке бора в расплав железа нарушается равновесие силового поля молекул в поверхностном слое, что оказывает значительное влияние на активность других элементов внедрения, в том числе кислорода и серы.

Под влиянием бора изменяется состав и морфология избыточных фаз (неметаллических включений), выделяющихся по границам зерен. Это повышает эксплуатационные характеристики, в т. ч. прочностные свойства стали. В легированных сталях модифицирующую способность бора связывают с формированием тугоплавкой фазы, возникающей в результате взаимодействия бора с переходными металлами и, особенно, с титаном и цирконием [3].

Высокая активность бора по отношению к кислороду и азоту позволяет использовать бор в качестве модификатора при производстве коррозионностойких, жаропрочных, нержавеющих, конструкционных и других типов качественных сталей. Вместе с тем, по мнению М.П. Брауна, бор является одним из наиболее эффективных микролегирующих элементов [4]. При этом следует отметить, что положительное влияние бора как микролегирующей добавки, реализуется только за счет растворенного бора, а не в составе неметаллических включений.

Микролегирующее действие бора на структуру расплава связано с процессами, происходящими в процессе кристаллизации. В этих условиях практическое влияние на термодинамику процессов имеет более высокая активность бора по отношению к азоту по сравнению с Cr, Ca, V, Nb. При этом основными нитридообразующими элементами в низкоуглеродистых сталях являются А и Ti.

Дуализм воздействия бора на качество стали объясняется особенностями строения его атома. В отличие от переходных металлов первого большого периода (в том числе железа) бор имеет устойчивую электронную конфигурацию и низкую растворимость в железе. В γ -железе бор образует растворы внедрения, в α -железе – растворы замещения. По данным различных источников растворимость бора в железе при $T = 1100-1200^\circ\text{C}$ составляет 0,02-0,15%. В процессе кристаллизации растворимость бора резко снижается. В α -железе растворяется не более 0,002% бора [6].

Бор, растворимый в металлической матрице, концентрируется в тонких приграничных слоях зерен аустенита, делая структуру их границ более совершенной. В присутствии бора существенно возрастает устойчивость аустенита к распаду при переохлаждении, что оказывает исключительно сильное влияние на закаливаемость стали [7]. Эффект стабилизации переохлажденного аустенита достигается при значительно меньших концентрациях бора, чем углерода, и меньших скоростях охладений от температур под закалку.

Установлено положительное влияние бора (в количестве $1-3 \cdot 10^{-3}\%$) на прокаливаемость и устойчивость стали против межкристаллитной коррозии МКК. Вследствие высокой температуры плавления бора 2027°C и его соединений (нитриды бора имеют температуру плавления 2730 , карбиды – 2345°C), он образует дополнительные центры кристаллизации и измельчает структуру металла. В процессах термомеханической обработки и контролируемой прокатки эти частицы закрепляют границы зерен аустенита и тем самым сдерживают их рост.

Высокая активность бора по отношению к кислороду и азоту позволяет использовать его в нестареющих и коррозионностойких сталях. Низколегированные конструкционные борсодержащие стали широко используются в машиностроении и сельском хозяйстве. Содержание бора в них составляет 0,002-0,005% [7]. Важнейшими предпосылками применения бора являются его дешевизна, доступность, экологическая безопасность и, главное, крайне малые требуемые содержания в стали.

Данные о равновесии в системе Fe-B-O весьма ограничены, т. к. несмотря на относительно высокое сродство к кислороду и низкую стоимость, бор в качестве раскислителя не применяется. Вместе с тем, знания раскислительной способности этого элемента необходимы для правильной организации производства борсодержащих и, особенно, низкоуглеродистых сталей, которым в настоящее время уделяется наиболее пристальное внимание.

Цель статьи – сопоставление значений раскислительной способности бора, полученных разными авторами на основании термодинамического анализа и экспериментальных данных с использованием различных методик. Выбор наиболее достоверных значений констант раскис-

ления железа бором в диапазоне концентрации 0,001-0,01%, характерных для низколегированных конструкционных сталей.

Изложение основного материала. Основным продуктом раскисления бора считают оксид бора B_2O_3 (III), который при температурах сталеплавильных процессов находится в жидком состоянии ($T_{пл} = 450^\circ C$, $T_{кип} = 2727^\circ C$). В связи с этим длительное время считали, что модифицирующее действие бора связано с его влиянием на состав и морфологию неметаллических включений.

В одной из первых экспериментальных работ Г. Дерге, на которую ссылается Г. Кньюпель [8], равновесие в системе Fe-B-O изучали в нейтральной атмосфере (гелий и аргон) при температурах 1550-1690°C. Расплав железа находился под шлаком из Fe_2O_3 - B_2O_3 . Константа раскисления металла бором (величина обратная константам равновесия) в области этих температур была относительно постоянной и составляла:

$$K_{B-O}^{-1} = [\%B]^2 \cdot [\%O]^3 = 2,4 \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

В этом диапазоне температур при концентрации $[B] = 0,1\%$ равновесное с ним содержание кислорода должно составлять 0,013%, при содержании $[B] = 0,01\%$ в равновесии с ним находится 0,062% кислорода. Данные результаты можно считать оценочными, так как они не учитывают влияние температуры и взаимной активности компонентов в системе.

В дальнейших работах при оценке раскислительной способности бора было учтено влияние основных термодинамических параметров системы.

Влияние температуры на величину константы равновесия впервые рассмотрено в работе Чино и Вада [9]. На основании термодинамических данных для константы раскисления ими было предложено следующее уравнение:

$$\lg[\%B]^2 \cdot [\%O]^3 = -\frac{44695}{T} + 15,43 \quad (2)$$

Согласно расчету при температуре 1600°C константа раскисления железа бором будет равна $K_{B-O}^{-1} = 3,7 \cdot 10^{-9}$, а равновесное содержание кислорода при $[B] = 0,1\%$ составит 0,007%. При температуре 1550°C константа раскисления равна $K_{B-O}^{-1} = 8 \cdot 10^{-10}$, а в равновесии с 0,1% бора будет находиться 0,004% кислорода. То есть в процессе кристаллизации раскислительная способность бора увеличивается почти в два раза.

Вместе с тем, как следует из представленных данных, при содержании $[B] < 0,01\%$ его раскислительная способность резко снижается. В диапазоне концентраций бора, характерных для микролегирования конструкционной стали 0,001-0,002%, в равновесии с ним при температуре 1600°C будет находиться более 0,15% кислорода. Это требует присутствия в металле более сильных раскислителей.

На рисунке представлено влияние бора на равновесное содержание кислорода в железе при различных температурах.

Аналогичные результаты были получены М.Я. Меджибожским [10]. Используя уравнение А.Н. Морозова и А.И. Строганова [11]

$$\lg K_{B-O}^{-1} = \lg[\%B]^2 \cdot f_o^3[\%O]^3 = -\frac{46510}{T} + 16,38, \quad (3)$$

а также литературные данные о влиянии бора на коэффициент активности кислорода (параметр взаимодействия $e_o^B = -0,4$), и предположив, что при низких концентрациях бора в металле 0,002-0,005% его активность равна концентрации ($f_B = 1$, $\alpha_B = [\%B]$), он определил, что при содержании бора в металле 0,1% и температуре 1600°C ($K_{B-O}^{-1} = 3,6 \cdot 10^{-9}$) равновесное с ним содержание кислорода составит 0,008%, а при температуре 1550°C ($K_{B-O}^{-1} = 7,4 \cdot 10^{-10}$) – 0,004%.

Сравнительные расчеты раскислительной способности бора и кремния (при содержании кремния 0,1% и температуре 1600°C в равновесии с ним находится 0,020%, а при температуре 1550°C – 0,012% кислорода) показали более высокую раскислительную способность бора. Вместе с тем, по данным других исследователей, это справедливо только при содержании бора менее 0,001%. По данным И.С. Куликова в диапазоне концентраций бора 0,1-0,2% раскислитель-

ная способность бора и кремния практически одинаковы [12]. В этой работе на основании анализа термодинамических данных определено влияние концентрации бора на активность компонентов в системе. Полученный расчетным путем параметр взаимодействия $e_O^B = -0,39$ (влияние бора на активность кислорода) практически совпал с экспериментальными данными других авторов: $e_O^B = -(0,31-0,40)$.

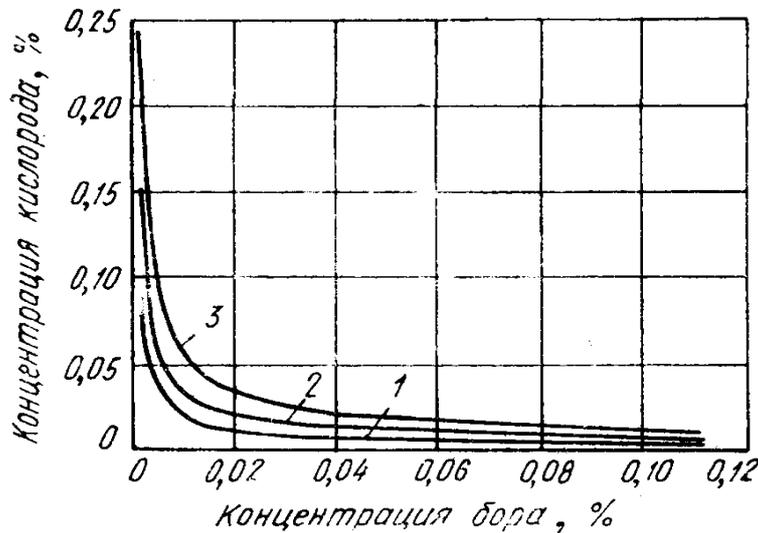


Рисунок – Зависимость концентрации кислорода в железе от содержания бора при различных температурах (по данным Чинно и Вада): 1 – 1550°C; 2 – 1600°C; 3 – 6550°C

Согласно расчетам при содержании $[B] = 0,1\%$ активность кислорода составит $f_o = 0,91$, а при $[B] = 0,01\%$ она несколько повышается и достигает величины $f_o = 0,99$.

Что касается коэффициента активности бора, то при содержании бора $[B] = 0,1\%$ и параметре взаимодействия $e_B^B = +0,065 + 0,01[B]$ коэффициент активности бора $f_B = 1,01$. При дальнейшем снижении концентрация бора e_B^B и f_B остаются практически постоянными.

Согласно термодинамическому анализу И.С. Куликова константа раскисления может быть определена по уравнению:

$$\lg K^{-1} = a_B^2 \cdot a_O^2 = -\frac{44005}{T} + 15,16. \quad (4)$$

При температуре 1600°C ($K_{B-O}^{-1} = 0,46 \cdot 10^{-8}$) и концентрации бора $[B] = 0,1\%$ равновесное содержание кислорода составит $[O] = 0,008\%$. При $T = 1550^\circ\text{C}$ константа раскисления будет меньше $K_{B-O}^{-1} = 1,05 \cdot 10^{-9}$, а равновесное содержание кислорода снизится до $[O] = 0,003\%$.

В точке экстремума $d \lg [O] / d[B] = 0$ при раскислении железа бором обеспечивается минимальное содержание кислорода. Оптимальная концентрация бора, при которой достигается минимальное содержание кислорода $[O] = 5,1 \cdot 10^{-3}\%$ составляет 0,85%.

В таблице представлены результаты исследования в системе Fe-B-O, полученные различными авторами с использованием различных методик исследования, в том числе методом электродвижущей силы (ЭДС), который дает наиболее точные результаты.

Приведены методики исследования, константы раскисления K_{B-O}^{-1} и равновесные содержания кислорода, рассчитанные для температур 1600 и 1550°C, характерные для жидкой стали и начала кристаллизации, а также параметры взаимодействия e_O^B и e_B^B , которые согласно теории Вагнера для бесконечно разбавленных растворов могут быть определены по уравнениям (5) и (6)

$$e_O^B = \frac{d \lg f_o}{d[B]} = \frac{\lg a_{[O]} - \lg [O]}{[B]}, \quad (5)$$

$$e_B^B = \frac{d \lg f_B}{d[B]} = \frac{\lg a_{[B]} - \lg [B]}{[B]}. \quad (6)$$

Таблица

Сопоставление литературных данных о равновесии бора и кислорода в расплавах железа

K^I		e_O^B	e_B^B	Равновесное содержание кислорода при В = 0,01%		Равновесное содержание кислорода при В = 0,001%		Метод и ссылка на литературу
1600°C	1550°C			1600°C	1550°C	1600°C	1550°C	
$0,37 \cdot 10^{-8}$	$0,82 \cdot 10^{-9}$	-	-	0,033	0,020	0,154	0,092	Рассчитано по термодинамическим данным Чино и Вада [9]
$0,36 \cdot 10^{-8}$	$0,74 \cdot 10^{-9}$	-0,40	-	0,034	0,019	0,158	0,090	То же М.Я. Меджибожский [10]
$0,46 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	-0,39	0,084-0,086	0,036	0,022	0,166	0,102	То же И.С. Куликова [12]
$0,37 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	0,033	-	0,154	-	Экспериментальные данные Ясихаси [12, с. 184]
$2,4 \cdot 10^{-8}$		-	-	0,062		0,288		Равновесие под шлаком из Fe ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ Г. Дерге [8]

Как следует из представленных данных, результаты термодинамических расчетов различных авторов практически совпадают. Величины констант раскисления и равновесных содержаний кислорода при температуре 1600°C, полученные на основании термодинамических расчетов И.С. Куликовым, практически совпадают с расчетами Чино и Вада, а также с экспериментальными величинами этого параметра в работах немецких и японских исследователей с использованием современных методов анализа (ЭДС) [12, 13].

Столь высокая сходимость термодинамических расчетов и экспериментальных данных, возможно, явилась причиной отсутствия в более поздние периоды исследований раскислительной способности бора. Исключение составляет работа Г.Г. Михайлова [14], в которой проанализированы влияния более сильных раскислителей (алюминия и кальция) на равновесие в системе Fe-B-O.

По раскислительной способности бор превосходит марганец, хром, ванадий и кремний, а по средству к азоту – кальций, хром, ванадий, значительно уступает титану и алюминию. Поэтому раскисление борсодержащих сталей одним алюминием будет недостаточным для полноты связывания азота.

С учетом вышеизложенного дополнительное микролегирование жидкой стали бором с целью предотвращения окисления бора в процессе непрерывной разливки необходимо проводить при остаточном содержании кислорода менее 0,033%, т. е. после окончательного раскисления алюминием. При этом совместно с ним кроме алюминия следует вводить более сильные раскислители, например, кальций, РЗМ, цирконий.

Учитывая высокую поверхностную активность бора, основным маркером предотвращения его окисления в процессе кристаллизации будет остаточное содержание в металле кислото-растворимого алюминия. Согласно анализу, приведенному в литературном источнике [15], величина этого параметра зависит от системы легирования и должна быть более 0,022%.

При производстве низкоуглеродистых и чистых сталей следует учитывать влияние алю-

миния на потерю пластичности металла, поэтому раскисление этих сталей необходимо начинать с вакуум-углеродного раскисления, которое гарантирует стабильно низкое содержание в металле свободного кислорода и неметаллических включений.

Выводы

Основной отличительной способностью бора является высокая поверхностная активность и, соответственно, способность влиять на размер и состояние границ зерна.

Показано, что данные термодинамических расчетов и экспериментальных исследований различных авторов (независимо от методики их расчетов) отличаются незначительно. При температуре 1600°C величина констант раскисления по данным различных авторов относительно стабильна и составляет: $K_{\text{В-О}}^{-1} = (0,36-0,46) \cdot 10^{-8}$. Для практических расчетов следует рекомендовать работу И.С. Куликова.

Влияние бора на активность кислорода относительно мало. При содержании бора менее 0,1% в случае образования $\text{В}_2\text{О}_3$ параметр взаимодействия составит $e_{\text{О}}^{\text{В}} = -(0,39-0,40)$. Влияние бора на собственную активность оценивается коэффициентом $e_{\text{В}}^{\text{В}} = 0,065+0,01[\text{В}]$. Показано, что независимо от содержания бора, в расплаве Fe-B-O образуется оксид бора $\text{В}_2\text{О}_3$.

Изучен механизм и особенности микролегирования бором. Влияние бора на эксплуатационные свойства стали за счет изменения структуры в процессе кристаллизации и термической обработки. Рассмотрена практика микролегирования бором, технология внепечной обработки, в том числе, совместный ввод с сильными раскислителями – алюминием и кальцием.

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. Браун М.П. Микролегирование стали / М.П. Браун. – Киев : Наукова думка, 1982. – 303 с.
5. Бабкова О.С. Воздействие бора на свойства расплавов и структурообразование сталей и сплавов на основе железа и никеля / О.С. Бабкова, Т.В. Свистунова // Металлург. – 2008. – № 3. – С. 56-60.
6. Гринберг Е.М. Металловедение борсодержащей конструкционной стали / Е.М. Гринберг. – М. : МИСиС, 1997. – 191 с.
7. Особенности микролегирования стали бором и новым материалом-боридом ферротитана / И.Р. Манашев [и др.] // Сталь. – 2009. – № 10. – С. 34-38.
8. Кньюппель Г. Термодинамические и кинетические закономерности / Г. Кньюппель. – М. : Металлургия, 1973. – 312 с. – (Раскисление и вакуумная обработка стали : в 2-х ч.; Ч. 1.)
9. Chino H. Tetsu to Hagane / H. Chino // Transactions of The Iron and Steel Institute of Japan. – 1966. – Т. 52. – Рр. 959-966.
10. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / М.Я. Меджибожский. – Киев; Донецк : Вища школа, 1986. – 279 с.
11. Морозов А.Н. Раскисление мартеновской стали / А.Н. Морозов, А.И. Строганов. – М. : Металлургиздат, 1955. – 155 с.
12. Куликов И.С. Раскисление стали / И.С. Куликов. – М. : Металлургия, 1972. – 207 с.
13. Buzek Z. Sbornik vedeckych prací Vysoké školy báňské v Ostravě / Z. Buzek, M. Macoszek, J. Szlaver // Hutnické Listy. – 1972. – Т. XXVIII. – № 8. – Рр. 547-557.
14. Михайлов Г.Г. Термодинамический анализ реакций взаимодействия марганца, кремния, магния, кальция, алюминия с кислородом в борсодержащем расплаве на основе железа / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макровец, Л.А. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 5-12. – (Серия: Металлургия).
15. 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. Braun M.P. *Mikrolegirovaniye stali* [Microalloying of steel]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 1982. 303 p. (Rus.)
5. Babkova O.S., Svistunova T.V. *Vozdeystviye bora na svoystva rasplavov i strukturoobrazovaniye staley i splavov na osnove zheleza i nikelya* [Impact of boron on melt properties and structurization of steels and alloys on the base of iron and nickel]. *Metallurg – Metallurgist*, 2008, no.3, pp. 56-60.
6. Grinberg Ye.M. *Metallovedeniye borsoderzhashchey konstruktsionnoy stali* [Metallurgy of boron-containing structural steel]. Moscow, MISiS, 1997. 191 p. (Rus.)
7. Manashev I.R., Shatokhin I.M., 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.)
8. Knyuppel' G. *Raskisleniye i vakuumnaya obrabotka stali. Chast' 1. Termodinamicheskiye i kineticheskiye zakonomernosti* [Deoxidation and vacuum treatment of steel. Part 1. Thermodynamic and kinetic regularities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 312 p. (Rus.)
9. Chino H. *Tetsu to Hagane. Transactions of The Iron and Steel Institute of Japan*, 1966, iss. 52, pp. 959-966.
10. Medzhibozhskiy M.Ya. *Osnovy termodinamiki i kinetiki staleplavil'nykh protsessov* [Fundamentals of thermodynamics and kinetics of steelmaking processes]. Kiyev; Donetsk, Vishcha shkola Publ., 1986. 279 p. (Rus.)
11. Morozov A.N., Stroganov A.I. *Raskisleniye martenovskoy stali* [Deoxidation of open-hearth steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955. 155 p. (Rus.)
12. Kulikov I.S. *Raskisleniye stali* [Is steel deoxidation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 207 p. (Rus.)
13. Buzek Zd., Macoszek M., Szlaver J. *Sbornik vedeckych prací Vysoke školy banské v Ostravě* [The Vedic Exercise Collection The High Rock in Ostrava]. *Hutnické. Listy*, 1972. t. XXVIII. no.8, pp. 547-557. (Slovak.)
14. Mihajlov G.G., Makrovec L.A., Smirnov L.A. *Termodinamicheskiy analiz reaktsiy vzaimodeystviya marganca, kremniya, magniya, kal'cija, aljuminija s kislorodom v borsoderzhashhem rasplave na osnove zheleza* [Thermodynamic analysis of the coupling reaction of manganese, silicon, magnesium, calcium, aluminum with oxygen in the boron-containing melt based on iron]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: «Metallurgiya» – Bulletin of the South Ural State University. Series «Metallurgy»*, 2015, vol. 15, no.2, pp. 5-12. (Rus.)
15. Nazyuta L.Yu., Orlichenko M.P., Kostyrya I.N. *Vliyaniye tekhnologii raskisleniya na stepen' usvoyeniya titana pri vyplavke nizkolegirovannykh 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 14.09.2017