

Изучение процесса металлотермического восстановления бора из шлака системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3^*$

Жучков В.И., Салина В.А., Сычев А.В.

Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург, Российская Федерация
valentina_salina@mail.ru, ntm2000@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты термодинамического моделирования влияния алюминия (0,005-0,1%, здесь и далее по тексту масс. %), содержащегося в металле, при постоянных концентрациях кремния (0,2%) и углерода (0,1%) на процесс восстановления бора из шлака системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ основностью $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ равной 5 в интервале температур 1400–1700 °С с шагом 50 °С. Для моделирования использован программный комплекс HSC Chemistry 6.12, разработанный Outokumpu Research Oy (Финляндия). Расчеты выполнены с применением модуля “Равновесные составы” (Equilibrium Compositions) при давлении газовой фазы 1 атм, содержащей 2,24 м³ N₂ (gas) в качестве нейтральной добавки. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о термодинамической возможности восстановления бора из шлака системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ кремнием и алюминием, концентрация которых в металле незначительна – 0,2 и 0,005–0,1% соответственно. Установлено, что увеличение исходного содержания алюминия в стали способствует повышению концентрации восстановленного бора в металле при содержании 4% B₂O₃ и заданной температуре. Так, при температуре процесса 1650 °С повышение исходного содержания алюминия с 0,005 до 0,1% позволило увеличить концентрацию бора в металле на 28,5%. Приведены результаты термодинамического моделирования, характеризующие влияние температуры на степень восстановления бора при различном содержании алюминия. Эксперименты по межфазному распределению бора между шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ и металлом проводили в высокотемпературной печи электросопротивления Таммана. Использовали низкоуглеродистую сталь, содержащую 0,005% Al. Показано, что выдержка металла под шлаком с содержанием 4,3% B₂O₃ сопровождается восстановлением бора, количество которого в готовой стали составляет 0,0089%. При этом коэффициент усвоения бора (K_B) равен 5,8%, что принципиально коррелирует с результатами термодинамического моделирования. Полученные результаты термодинамического моделирования и экспериментальные данные показали принципиальную возможность осуществления прямого микролегирования стали бором за счет его восстановления алюминием и кремнием, содержащимися в металле.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, оксидный и металлический расплавы, алюминотермия, степень восстановления, борсодержащая сталь.

ВВЕДЕНИЕ

Среди элементов, применяемых в металлургии для микролегирования и других целей, особое место занимает

бор, отличающийся тем, что может воздействовать на свойства стали (в элементном виде) и оксидных системах (в виде B₂O₃) в сверхмалых количествах. Следует отметить многофункциональность влияния бора на свойства металла (прочностные и пластические характеристики, прокаливаемость, межкристаллитную коррозию), а также широкий сортамент обрабатываемых им сталей (углеродистые, коррозионностойкие, легированные и т.д.) [1].

АКТУАЛЬНОСТЬ, НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Обзор научной литературы показывает, что много работ по использованию бора в металлургии посвящено его влиянию на структуру и свойства обрабатываемого металла (стали и др.) [1-13]. Авторами работы [2] отмечено положительное влияние легирования металла алюминием на прокаливаемость и механические свойства толстолистовой стали, микролегированной бором.

В работе [3] изучено влияние бора на улучшение свойств металла и установлена возможность определения «эффективного» бора в стали. Освоена технология микролегирования низкоуглеродистой стали бором с получением гарантированного его содержания на уровне не менее 0,0008%.

Проведены комплексные исследования по изучению влияния бора на структуру, склонность к науглероживанию и стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК) низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали в зависимости от температуры термической обработки [4]. Установлено, что наличие 0,003% В оказывает положительное, а 0,03 и 0,06% В и в меньшей степени 0,2...0,4% В – отрицательное влияние на стойкость против МКК стали 02X17H15 в слабоокислительных средах после закалки при температурах выше 1100 °С. Авторы работы [5] исследовали влияние добавок бора в металл до 0,0082% и определили, что если [В] > 0,004%, то после окончательного отжига образуется фаза Fe₂B. Такая сталь получает благоприятную структуру и улучшенные магнитные свойства. Компания Salzgitter разработала термически улучшаемую легированную марганцем и бором сталь, обладающую хорошей деформируемостью и почти удвоенной по сравнению с микролегированными другими элементами сталями износостойкостью [6].

Количество вводимого бора зависит от марки стали и ее раскисленности. Границы содержания бора при микроле-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 16-19-10435). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

гировании стали указываются от 0,0005 до 0,01%, но большинство авторов считают оптимальной концентрацией 0,001-0,003% В [7-12]. Отмечено положительное влияние борсодержащих материалов на физико-химические свойства шлаков [13]. Об улучшении механических свойств низколегированной стали при использовании комплексных борсодержащих ферросплавов сообщается в ряде работ [14-17]. Показано, что комплексное модифицирование позволяет предотвратить транскристаллизацию и измельчить микроструктуру в отливках. Методом термодинамического анализа авторы работы [18] определили, что при современных способах рафинирования стали, позволяющих достигнуть глубины рафинирования по кислороду до 0,0002%, введение бора после процесса раскисления не приводит к потерям эффективного бора за счет взаимодействия с остатками кислорода в стали. Установлено, что марганец и кремний не способны блокировать окисление вводимого в сталь бора. Алюминий и магнийсодержащие лигатуры способны предотвратить окисление введенного в сталь бора и таким образом позволить стабилизировать технологию получения сталей, модифицированных бором.

Приведенные работы указывают на благоприятное влияние бора на характеристики стали при условии, что содержание его находится в очень узком диапазоне концентраций с отклонениями в тысячные доли процента. В тоже время при использовании шлаков, содержащих B_2O_3 , возможен переход бора в металл в малых, но достаточных для этого элемента количествах, в связи с чем возникает необходимость в получении данных о коэффициентах распределения бора между оксидной и металлической фазами с различной концентрацией их компонентов. Сведений о таком распределении очень мало.

Авторы работы [19] определили коэффициент распределения бора между металлом и шлаками систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$ и $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ при температуре 1873К, который составил от 2 до 2,5. Установлено, что для системы $CaO-MgO-SiO_2$ коэффициент распределения бора не зависит от состава шлака, а для системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ – снижается при увеличении содержания Al_2O_3 .

В работе [20] приведены результаты термодинамического моделирования (ТМ) по изучению межфазного распределения бора между металлом с различным исходным содержанием кремния, %: 0,1; 0,4; 0,6; 0,8 и шлаком с основностью 5. Установлено, что повышение исходной концентрации кремния в металле позволило увеличить степень восстановления бора на 76,3% и снизить содержание кремния в готовом металле на 10; 9,25; 8,3 и 7,63% соответственно при температуре 1600 °С.

Представлены данные о распределении серы при содержании 1–4% B_2O_3 в шлаке и его основности 2–5 в интервале температур 1500–1700 °С, согласно которым отрицательное воздействие оксида B_2O_3 на рафинирующие свойства шлака снижается в диапазоне высоких значений основности шлака с 3 до 4, обеспечивая содержание серы в металле не более 0,003-0,004% при 4% B_2O_3 в шлаке. Повышение основности шлака до 5 способствует снижению концентрации серы в металле до 0,001%. Полученные результаты ТМ показали хорошую сходимость с экспериментальными данными [21].

Таким образом, результаты представленного аналитического обзора работ показали, что сведения о процессе восстановления бора из оксида и его межфазном распределении между оксидной и металлической фазами в широком диапазоне химического состава мало изучены. Отсутствуют данные о процессах восстановления бора из шлаков, содержащих B_2O_3 , элементами-восстановителями, входящими в состав обрабатываемой стали (алюминий, кремний, углерод).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с этим определена необходимость выполнения ТМ и экспериментальных исследований по изучению влияния концентрации алюминия (0,005–0,1%) в металле при постоянном содержании кремния (0,2%) и углерода (0,1%) на степень восстановления бора из шлака основностью $(CaO)/(SiO_2)$, равной 5, в интервале температур 1400–1700 °С.

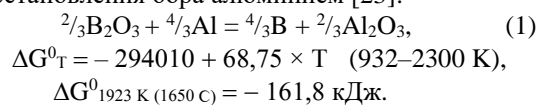
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных шихтовых материалов для проведения ТМ использовали образцы стали, содержащей, %: 0,1 С; 0,2 Si; 0,005, 0,01, 0,05, 0,1 Al; Fe-остальное. Химический состав шлака для проведения ТМ был следующий, %: 60 CaO; 12 SiO_2 ; 8 MgO; 16 Al_2O_3 ; 4 B_2O_3 .

Расчеты ТМ проведены с применением программного комплекса HSC 6.12 Chemistry (Outokumpu), основанного на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [22]. Равновесный состав многокомпонентной оксидной и металлической систем определен с применением модуля «Равновесные составы» (Equilibrium Compositions) в интервале температур 1400–1700 °С с шагом 50 °С и давлении газовой фазы, равном 1 атм. Для вычисления использовали алгоритм программы минимизации потенциала Гиббса «GIBBS». Газовая фаза системы содержала 2,24 м³ N₂ (gas) в качестве нейтральной добавки для ускорения вычислительной процедуры поиска равновесного состава.

На рис. 1 приведены результаты ТМ по изменению содержания бора в металле в зависимости от температуры процесса при различных исходных концентрациях алюминия. Определено, что повышение температуры процесса согласно результатам ТМ снизило содержание бора в металле при постоянной исходной концентрации алюминия в нем. Так, при исходной концентрации алюминия 0,005% в металле содержание бора снизилось на 29,2% в интервале температур 1500-1700 °С. Аналогичная зависимость получена и для металла с исходным содержанием алюминия 0,1%, в котором содержание бора уменьшилось на 25,6%.

Наибольшую термодинамическую возможность имеет реакция восстановления бора алюминием [23]:



Согласно результатам ТМ увеличение исходного содержания алюминия в металле с 0,005 до 0,1% способствует повышению концентрации восстановленного бора в металле при заданной температуре. Так, при температуре процесса 1650 °С повышение исходного содержания алюминия с 0,005 до 0,1% позволило увеличить концен-

трацию бора в металле на 28,5%. При этом количество алюминия в готовой стали уменьшилось до 0,0029 и 0,0044% соответственно, что на 42,2 и 95,6% меньше исходного его содержания.

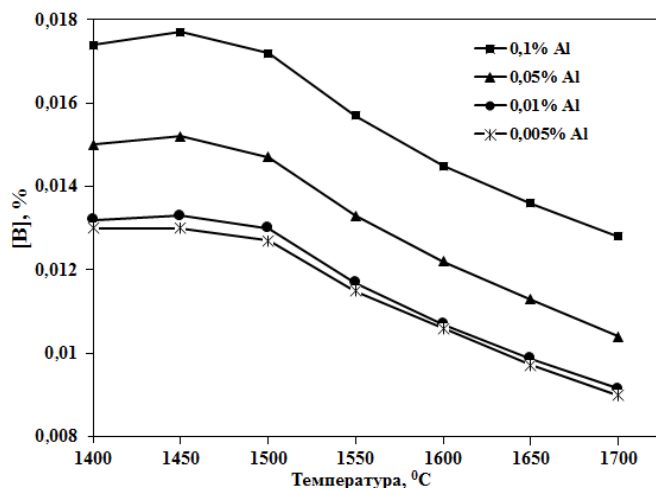
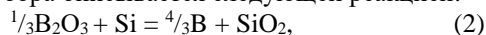


Рис. 1. Изменение содержания [B] в зависимости от температуры при различных исходных концентрациях алюминия

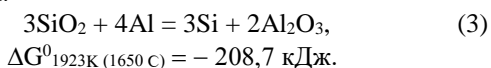
В процессе восстановления бора участвует и кремний. Термодинамическая возможность силикотермического восстановления бора описывается следующей реакцией:



и согласно вычислениям по ПК HSC 6.12 Chemistry (Outokumpu) [22] получено следующее значение энергии Гиббса реакции $-\Delta G^0_{1923\text{K}(1650\text{C})} = -23,4 \text{ кДж}$.

Значение потенциала Гиббса реакции (1) свидетельствует о более высокой термодинамической возможности алюминотермического восстановления бора при температуре 1650 °C.

В результате силикотермического восстановления бора концентрация кремния в готовой стали снизилась на 9,2% при исходном содержании алюминия 0,005% и температуре 1650 °C. При начальном содержании алюминия 0,01% в металле расход кремния-восстановителя уменьшился и составил 7,5%. Повышение исходного содержания алюминия до 0,05% привело к увеличению концентрации кремния в готовой стали до 0,21%, что на 5 % больше заданного. При такой начальной концентрации алюминия (0,05%), по-видимому, начинается алюминотермической процесс восстановления кремния из кремнезема по реакции:



Последующее повышение исходной концентрации алюминия до 0,1% позволило еще больше увеличить содержание кремния в готовой стали (на 27%) по сравнению с начальной его концентрацией в металле (0,2%).

В табл. 1 представлены данные ТМ о степени восстановления бора в зависимости от содержания алюминия в стали в интервале температур 1400-1700 °C, которые свидетельствуют об ее уменьшении при повышении температуры процесса для всех исходных концентраций алюми-

ния и увеличении степени восстановления бора при повышении концентрации алюминия в металле.

Таблица 1

Содержание [Al _{исх.}], %	Степень восстановления бора, %						
	при температуре, °C						
	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700
0,005	9,4	9,49	9,22	8,34	7,65	7,04	6,51
0,01	9,56	9,66	9,38	8,48	7,78	7,16	6,63
0,05	10,88	10,99	10,68	9,67	8,87	8,15	7,53
0,1	12,63	12,76	12,47	11,35	10,51	9,82	9,29

Представленные в работе [20] результаты ТМ восстановления бора кремнием и алюминием, начальная концентрация которых равна 0,1 и 0,005% соответственно, при температуре 1650 °C показали, что степень восстановления бора равна 4,36%. При увеличении содержания кремния до 0,4% степень восстановления бора повысилась до 11,41%, что согласуется с результатами, полученными нами в работе [20].

Полученные результаты ТМ свидетельствуют о термодинамической возможности восстановления бора алюминием, исходная концентрация которого в металле составляет 0,005-0,1%, и кремнием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по межфазному распределению бора между шлаком и металлом проводили в высокотемпературной электропечи типа Таммана. В качестве шихтовых материалов использовали синтетический шлак и металл. Химический состав синтетического шлака, %: 52,2 CaO; 12,9 SiO₂; 15,4 Al₂O₃; 8,1 MgO; 4,3 B₂O₃ и металла, %: 0,082 C; 0,4 Si; 0,005 Al; 0,44 Mn; Fe – остальное.

Масса шлака составляла 10% от массы металла. Шихты нагревали в корундовом тигле до температуры 1600 °C и осуществляли выдержку в тигле в течение 20 мин под шлаком, которая сопровождалась восстановлением бора. Основным восстановителем бора являлся кремний, содержание которого в металле после опыта снизилось на 22%, а также алюминий. В полученной стали содержалось 0,31% Si и 0,0089% B. Коэффициент усвоения бора – $K_B = \frac{B}{[B]}$ составил 5,8%.

Проведенные исследования показали, что степень восстановления бора по результатам ТМ близка к значению усвоения бора при экспериментальных исследованиях. Экспериментальное изучение распределения бора между оксидной и металлической фазами подтверждает данные ТМ о возможности восстановления бора из шлака, содержащего 4% B₂O₃, алюминием и кремнием, находящимися в стали, и о влиянии исходного содержания алюминия в расплаве на степень восстановления бора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термодинамическое моделирование и экспериментальные исследования показали принципиальную возможность восстановления бора из шлака системы CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ алюминием и кремнием, присутствующими в низкоуглеродистом металле. Концентрацию бора в металле можно регулировать изменением температуры процесса и содержания алюминия в стали. Коэффициент усвоения бора (K_B) составил 5,8%, что принци-

ально коррелирует с результатами термодинамического моделирования. Практическая значимость результатов исследований заключается в их использовании при разработке технологии прямого микролегирования стали бором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение борсодержащих материалов в металлургии / В.И. Жучков, А.А. Акбердин, Н.А. Ватолин и др. // Электротехнология. – 2011. – №3. – С. 25-28.
2. Effect of alloying element Al on hardenability and mechanical properties of micro-B treated ultra-heavy plate steels / Tao Pan, Xiaoyong Wang, Hang Su, Caifu Yang // Acta metallurgica sinica. – 2014. – Vol. 50, No.4. – P. 431-438.
3. Роль бору в процесах отримання якісної сталі і проблеми його визначення / О.Г. Величко, Л.В. Камкіна, В.С. Манідін и др. // Теория и практика металлургии. – 2015. – №1-2. – С. 104-108.
4. Дергач Т.А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали // Вопросы атомной науки и техники. – 2005. – №5 (88). – С. 80-86.
5. Wan Yong. Effect of boron content on the microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels / Yong Wan, Weiqing Chen // J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed. – 2015. – Vol. 30, No.3. – P. 574-579. DOI: 10.1007/s11595-015-1191-9
6. Salzgitter: Stahlwerkstoff für den Extremfall // Stahl und Eisen. – 2015. – Vol. 135, No.4. – P. 33.
7. Лякишев Н.П. Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
8. Ершов Г.С. Физико-химические основы рационального легирования стали и сплавов / Г.С. Ершов, Ю.Б. Бычков. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
9. Development of low carbon Nb-Ti-B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe / C.J. Heckmann, D. Ormston, F. Grimpe et. al. // Iron and Steelmaking. – 2005. – No.4. – P. 57- 60. DOI: 10.1179/174328105X48034
10. Разработка ультравысокопрочных труб X120 UEO / Х. Асахи, Т. Хаара, Е. Тзуру и др. // Современные стали для газонефтепроводных труб, проблемы и перспективы: сб. докл. Международного семинара (Москва, 15-16 марта 2006 г.). – Москва, 2006. – С. 123-130.
11. Upadhyaya N. Effect of Addition of Boron and Nitrogen on the Corrosion Resistance of Modified 9Cr -1Mo Ferritic Steel / N. Upadhyaya, M.G. Pujara, T. Sakthivel et al. // Procedia Engineering. –2014. – No.86. – P. 606-614. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.086
12. Effect of alloying elements (Sb, B) on recrystallization and oxidation of Mn-containing IF steel / Ya-long Zhang, Ying-yi Zhang, Fei-hua Yang, Zuo-tai Zhang // Journal of iron

and steel research international. – 2013. – Vol. 20, No.3. – P. 39-44. DOI: 10.1016/S1006-706X(13)60067-9

13. Effect of B₂O₃ on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux / H. Wang, T. Zhang, H. Zhu et al. // ISIJ International. – 2011. – Vol. 51, No.5. – P. 702-706. DOI: 10.2355/isijinternational.51.702

14. Effect of niobium and titanium addition on the hot ductility of boron containing steel / Chul Kyung Cho, Dong Jun Mun, Yang Mo Koo, Jae Sang Lee // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528, No.10-11. – P. 3556-3561. DOI: 10.1016/j.msea.2011.01.097

15. Hot flow behavior of boron microalloyed steels / E. Lopez-Chipres, I. Mejia, C. Maldonado et al. // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 480, No.1-2. – P. 49-55. DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.067

16. Stumpf W. The hot working characteristics of boron bearing and conventional low carbon steel / W. Stumps, K. Banks // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol. 418, No.1-2. – P. 86-94. DOI: 10.1016/j.msea.2005.11.020

17. Отработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора / А.И. Степанов, А.А. Бабенко, А.В. Сычев и др. // Металлург. – 2014. – №7. – С. 50-52.

18. 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. Серия “Металлургия”. – 2015. – Т. 15, №2. – С. 5-12.

19. Jakobsson Lars Klemet. Distribution of boron between silicon and CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ slags / Lars Klemet Jakobsson, Merete Tangstad // Metallurgical and Materials Transactions, B. – 2014. – Vol. 45B, No.5. – P. 1644-1655. DOI: 10.1007/s11663-014-0088-x

20. Distribution of boron between oxide slag and steel / A.V. Sychev, V.A. Salina, A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, No.2. – P. 105-107. DOI: 10.3103/S0967091217020127

21. Thermodynamic modeling of metal desulfurization with boron-containing slags of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ system / V.A. Salina, A.V. Sychev, V.I. Zhuchkov, A.A. Babenko // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, No.12. – P. 768-771. DOI: 10.3103/S0967091217120117

22. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. – Pori: Outokumpu research OY, 2002.

23. Гасик М.И. Теория и технология электротехнологии ферросплавов: учеб. для вузов. / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1999. – 764 с.

Study of the process of metal-thermal reduction of boron from the slag of the system CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃

Zhuchkov V.I., Salina V.A., Sychev A.V.

Advisor group of the RAS

Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Yekaterinburg, Russian Federation

*valentina_salina@mail.ru, ntm2000@mail.ru

Abstract. The results of thermodynamic modeling of the effect of aluminum (0.005–0.1%) contained in the metal at constant silicon concentrations (0.2%) and carbon (0.1%) on the boron reduction process from the slag of the system CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ basicity (CaO)/(SiO₂) equal to 5 in the temperature range 1400–1700 °C in steps of 50 °C are presented. For modeling, the software complex HSC Chemistry 6.12 developed by Outokumpu Research Oy (Finland) was used. The calculations using the Equilibrium Compositions module at a gas-phase pressure of 1 atm, containing 2.24 m³ of N₂ (gas) as a neutral additive were performed. The obtained simulation results indicate the thermodynamic possibility of boron reduction from the slag of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ system by silicon and aluminum, whose concentration in the metal is insignificant – 0.2 and 0.005–0.1%, respectively. It was found that an increase in the initial aluminum content in the steel promotes an increase in the concentration of reduced boron in the metal with a content of 4% B₂O₃ and a given temperature. Thus, at a process temperature of 1650 °C, an increase in the initial aluminum content from 0.005 to 0.1% made it possible to increase the boron concentration in the metal by 28.5%. The results of thermodynamic modeling characterizing the effect of temperature on the degree of boron reduction at different aluminum contents are presented. Experiments on the inter-phase distribution of boron between the slag of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ system and the metal were carried out in a high-temperature Tamman resistance furnace. Low-carbon steel containing 0.005% Al was used. It was shown that aging of the metal under the slag containing 4.3% of B₂O₃ is accompanied by reduction of boron, the amount of which in the finished steel is 0.0089%. The coefficient of boron assimilation (K_B) is 5.8%, which is in principle correlated with the results of thermodynamic modeling. The obtained results of thermodynamic modeling and experimental data showed that it is possible in principle to directly microlite boron steel by reducing it with aluminum and silicon contained in the metal.

Keywords: thermodynamic modeling, oxide and metal melts, aluminothermy, degree of reduction, boron-containing steel.

REFERENCES

1. V.I. Zhuchkov, A.A. Akberdin, N.A. Vatolin et al. Application of boron-containing materials in metallurgy, *Russian metallurgy (Metally)*, 2011, vol. 2011, no.12, pp. 1134-1137. DOI: 10.1134/S003602951112024X
2. Tao Pan, Xiaoyong Wang, Hang Su, Caifu Yang 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.

3. Velichko O.G., Kamkin L.V., Manidin V.S. et al. The role of boron in the processes of obtaining a qualitative and problem of its determination [Rol' boru v protsesakh otrimannya yakisnoï stali i problemi yogo viznachennya], *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and Practice of Metallurgy]*, 2015, no.1-2, pp. 104-108. (in Uk.)

4. Dergach T.A. The influence of boron on the microstructure and properties of pipes from low-carbon austenitic chromium-nickel steel [The influence of boron on the microstructure and properties of pipes from low-carbon austenitic chromium-nickel steel], *Problems of Atomic Science and Technology [Problems of Atomic Science and Technology]*, 2005, no.5 (88), pp. 80-86. (in Russ.)

5. Wan Yong, Weiqing Chen Effect of boron content on the microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 2015, vol. 30, no.3, pp. 574-579. DOI: 10.1007/s11595-015-1191-9

6. Salzgitter: Stahlwerkstoff für den Extremfall, *Stahl und Eisen*, 2015, vol. 135, no.4, p. 33.

7. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchie stali i splavy* [Boron steels and alloys], Moscow, Metallurgy, 1986, 192 p. (in Russ.)

8. Ershov G.S., Bychkov Yu.B. *Fiziko-khimicheskie osnovy ratsional'nogo legirovaniya stali i splavov* [Physical and chemical bases of rational alloying of steel and alloys], Moscow, Metallurgy, 1982, 360 p. (in Russ.)

9. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F. et al. Development of low carbon Nb-Ti-B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe, *Iron and Steelmaking*, 2005, no.4, pp. 57-60. DOI: 10.1179/174328105X48034

10. Asahi H., Haar T., Tzuru E. et al. Development of ultra-high-strength pipes X120 UEO [Razrabotka ultravysokoprochnykh trub X120 UEO], *Sb. dokl. Mezhdunarodnogo seminar "Sovremennye stali dlya gazonefteprovodnykh trub, problemy i perspektivy"* [Collection of articles. report International Seminar "Modern steel for gas-oil-conducting pipes, problems and prospects", (Moscow, March 15-16, 2006), Moscow, 2006, pp. 123-130. (in Russ.)

11. Upadhyaya N., Pujara M.G., Sakthivelb T. et al. Effect of Addition of Boron and Nitrogen on the Corrosion Resistance of Modified 9Cr -1Mo Ferritic Steel, *Procedia Engineering*, 2014, no.86, pp. 606-614. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.086

12. Ya-long Zhang, Ying-yi Zhang, Fei-hua Yang, Zuo-tai Zhang. Effect of alloying elements (Sb, B) on recrystallization and oxidation of Mn-containing IF steel, *Journal of iron and steel research international*, 2013, vol. 20, no.3, pp. 39-44. DOI: 10.1016/S1006-706X(13)60067-9

13. Wang H., Zhang T., Zhu H. et al. Effect of B₂O₃ on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO-based refining flux, *ISIJ International*, 2011, vol. 51, no.5, pp. 702-706. DOI: 10.2355/isijinternational.51.702

14. Chul Kyung Cho, 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.10-11, pp. 3556-3561. DOI: 10.1016/j.msea.2011.01.097

15. Lopez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C. et al. Hot flow behavior of boron microalloyed steels, *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 480, no.1-2, pp. 49-55. DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.067

16. Stumpf W., Banks K. The hot working characteristics of boron bearing and conventional low carbon steel, *Materials Science and Engineering A*, 2006, vol. 418, no.1-2, pp. 86-94. DOI: 10.1016/j.msea.2005.11.020

17. Stepanov A.I., Babenko A.A., Sychev A.V. et al. Testing the technology of micro-alloying of boron steel using ferrosilicon [Otrabotka tekhnologii mikrolegirovaniya stali borom s ispol'zovaniem ferrosilikobora], *Metallurg*, 2014, no.7, pp. 50-52. (in Russ.)

18. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic analysis of the reaction of the interaction of man-

ganese, silicon, magnesium, calcium, aluminum with oxygen in a boron-containing iron-based melt, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2015, vol. 15, no.2, pp. 5-12. (in Russ.)

19. Jakobsson Lars Klemet, Merete Tangstad. Distribution of boron between silicon and CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, *Metallurgical and Materials Transactions, B*, 2014, vol. 45B, no.5, pp. 1644-1655. DOI: 10.1007/s11663-014-0088-x

20. Sychev A.V., Salina V.A., Babenko A.A., Zhuchkov V.I. Distribution of boron between oxide slag and steel, *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no.2, pp. 105-107. DOI: 10.3103/S0967091217020127

21. Salina V.A., Sychev A.V., Zhuchkov V.I., Babenko A.A. Thermodynamic modeling of metal desulfurization with boron -containing slags of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ system, *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no.12, pp. 768-771. DOI: 10.3103/S0967091217120117

22. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database, Pori, Outokumpu research OY, 2002.

23. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov: ucheb. dlya vuzov* [Theory and technology of electrometallurgy of ferroalloys: a textbook for universities], Moscow, SP Internet Engineering, 1999, 764 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Жучков В.И. Изучение процесса металлургического восстановления бора из шлака системы CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃ / В.И. Жучков, В.А. Салина, А.В. Сычев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.6, №4. – С. 23-28. DOI: 10.24892/RIJE/20180405

Reference to article

Zhuchkov V.I., Salina V.A., Sychev A.V. Study of the process of metal-thermal reduction of boron from the slag of the system CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol.6, no.4, pp. 23-28. DOI: 10.24892/RIJE/20180405