

УДК 536 + 669.162.275.25

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУЛЬФУРАЦИИ МЕТАЛЛА БОРСОДЕРЖАЩИМИ ШЛАКАМИ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ *

Салина В.А., к.т.н., старший научный сотрудник (valentina_salina@mail.ru)

Сычев А.В., к.т.н., старший научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)

Жучков В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)

Бабенко А.А., д.т.н., главный научный сотрудник (babenko251@gmail.com)

Институт металлургии УрО РАН

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

Аннотация. Проведено термодинамическое моделирование процесса десульфурации металла борсодержащими шлаками системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ с применением программного комплекса HSC 6.12 Chemistry (Outokumpu). Изучены влияния температуры процесса (1500 – 1700 °С), основности шлака (2 – 5) и содержания B_2O_3 (1 – 4 %)¹ на десульфурацию стали. Установлено, что увеличение температуры процесса десульфурации металла с 1500 до 1700 °С способствует снижению содержания серы в изученном диапазоне основности шлака. При температуре 1600 °С содержание серы в металле составило 0,0052 % для шлака основностью 2, а при 1650 °С ее концентрация составила 0,0048 %. Повышение основности шлака с 2 до 5 оказало благоприятное влияние на степень десульфурации металла, увеличивая ее соответственно с 80,7 до 98,7 % при температуре 1600 °С. При этом повышение концентрации B_2O_3 в шлаке оказало отрицательное влияние на процесс десульфурации металла. Шлак основностью 2, содержащий 1 и 4 % B_2O_3 , позволил получить количество серы в металле соответственно 0,0052 и 0,012 % при температуре 1600 °С, а шлак основностью 5 с таким же содержанием B_2O_3 при той же температуре обеспечил количество серы в металле на уровне 0,00036 и 0,001 % соответственно. Следует отметить, что более благоприятные условия процесса десульфурации металла обеспечил шлак без оксида B_2O_3 по сравнению с борсодержащим. Шлаки основностью 2 и 5 без B_2O_3 согласно результатам термодинамического моделирования позволили получить металл при температуре 1600 °С с содержанием серы 0,0039 и 0,00019 % соответственно. Результаты расчета термодинамического моделирования процесса десульфурации металла борсодержащими шлаками системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ основностью 2 – 5 в интервале температур 1500 – 1700 °С коррелируют с данными экспериментальных исследований и могут иметь практическое значение при совершенствовании технологии процесса десульфурации стали борсодержащими шлаками в сталеплавильном производстве.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, борсодержащий шлак, сталь, температура, основность, десульфурация стали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-955-959

Проблема улучшения качества стали во многом зависит от снижения в ней содержания серы. Ее решение позволит значительно повысить экономическую эффективность производства металлопродукции.

Роль шлаков и их влияние на качество стали в металлургическом производстве многообразны и зависят от их химического состава (основности), физико-химических свойств (вязкости, поверхностного и межфазного натяжения, плотности и т.д.). Одна из главных особенностей основных шлаков заключается в способности поглощать серу – десульфурация стали [1 – 5].

Результаты исследования, посвященные изучению процесса десульфурации как теоретического, так и прикладного характера, приведены в работах [6 – 11]. Так, авторы работы [6], сравнивая экспериментальные и расчетные значения коэффициентов распределения серы между металлом и шлаком в зависимости от отношения $(\text{CaO})_{\text{св}}/(\text{FeO})$ и активности кислорода в метал-

ле, установили, что при $(\text{CaO})_{\text{св}} = 25\%$ и/или окисленности металла ($a_0 \geq 0,0015\%$) и шлака ($\text{FeO} > 0,2\%$) распределение серы между металлом и шлаком близко к равновесному. Время, необходимое для снижения содержания серы с 0,010 – 0,020 до 0,002 – 0,005 %, составило 35 – 45 мин.

Для производства сталей с низким и сверхнизким содержанием серы процесс десульфурации осуществляют на установках ковш-печь путем формирования высокоосновных шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с добавлением плавикового шпата (CaF_2) [7 – 9]. В работе [9] изучено влияние твердых шлакообразующих смесей (извести и плавикового шпата марки Ф-85) на процессы десульфурации и дефосфорации стали. При этом сталь 20ГЛ в ковше дополнительно обрабатывали алюминием, силикокальцием, редкоземельными металлами, что позволило получить содержание серы в металле 0,004 %.

Однако влияние фторида кальция на физико-химические свойства шлака не обеспечивает необходимой десульфурации стали из-за его кратковременного

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 16-19-10435).

¹ Здесь и далее по тексту содержание в % (по массе).

действия. Кроме того, применение CaF_2 , выделяющего газообразный фтор, в совокупности с образованием «самораспадающихся» шлаков ухудшает экологическую обстановку. Авторами работы [8] проведены исследования по замене фторида кальция на оксид V_2O_3 . Установлено, что при 4 % V_2O_3 и отношении $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,5 - 3,0$, конечное содержание серы в металле находится в диапазоне 0,002 – 0,004 %, в то время как при 4 % CaF_2 и таком же отношении $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ее количество составило 0,005 – 0,008 %. Однако в литературе имеются сведения и о незначительном влиянии оксида V_2O_3 на степень десульфурации металла [12].

Добавка борного ангидрида в сталеплавильные шлаки повышает их жидкоподвижность. Присадка от 0,5 до 3 % V_2O_3 позволяет снизить вязкость в среднем на 20 %, а температуру кристаллизации на 50 – 300 °C [13]. В работе [14] также отмечено положительное влияние оксида V_2O_3 в шлаке на его вязкость.

Применение оксида V_2O_3 оказывает разностороннее влияние на свойства шлака. Например, для стабилизации от силикатного распада высокоосновных шлаков выплавки рафинированного феррохрома в работе [10] использовали V_2O_3 . Установлено, что присутствие в шлаке 0,25 – 0,50 % V_2O_3 образует высокотемпературные (не распадающиеся) формы двухкальциевого силиката.

Результатами работы [11] подтверждено положительное влияние V_2O_3 на процессы десульфурации и дефосфорации стали даже в условиях отсутствия постоянного динамического перемешивания, а авторами работы [15] доказано, что добавление оксида бора может вызвать как увеличение, так и снижение теплопроводности шлака системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{V}_2\text{O}_3$ в зависимости от основности.

В работе [16] приведены результаты термодинамического моделирования (ТМ) влияния кремния, алюминия и углерода, содержащихся в металле, на процесс межфазного распределения бора из оксидной системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_3$, которые показали принципиальную возможность осуществления прямого микролегирования стали бором.

Имеются и другие работы, свидетельствующие о положительном влиянии бора на различных переделах черной металлургии [17 – 21].

В связи с недостаточной изученностью влияния оксида V_2O_3 системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_3$ на процесс десульфурации стали проведены термодинамические расчеты с применением программного комплекса HSC 6.12 Chemistry (Outokumpu), основанного на минимизации свободной энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [22]. Расчеты выполнены с применением модуля «Равновесные составы» (Equilibrium Compositions) в интервале температур 1500 – 1700 °C через 50 °C, давлении 1 атм, объеме газовой фазы 2,24 м³ N₂; количество шлака составляло 25 % от массы металла. Химический состав шлака, ис-

пользованного для проведения ТМ, приведен в таблице.

Химический состав стали для проведения ТМ следующий: 0,4 % C; 0,2 % Si; 0,02 % Al; 0,8 % Mn; 0,1 % Cr; 0,027 % S; Fe – остальное.

На основе результатов ТМ построены зависимости содержания серы в металле от температуры при основности шлака 2 (рис. 1, а) и 5 (рис. 1, б), разном содержании V_2O_3 в шлаке (1, 3 и 4 %) и без V_2O_3 , а также зависимость содержания серы в металле от основности шлака при температуре 1600 °C с 1 % V_2O_3 и без V_2O_3 в шлаке (рис. 2).

Из рис. 1, а видно, что шлаки основностью 2, содержащие 1 % V_2O_3 , обладают высокими рафинирующими свойствами. При температуре 1600 °C степень десульфурации металла достигает 80,7 % и обеспечивает содержание серы на уровне 0,0052 %. С увеличением температуры процесс рафинирующие свойства шлака улучшаются, обеспечивая содержание серы в металле при температуре 1650 °C не более 0,0048 %. Повышение содержания оксида V_2O_3 до 4 % ухудшает рафинирующие свойства шлака. При температуре 1650 °C степень десульфурации металла достигает 57 % и обеспечивает содержание серы на уровне 0,0116 %.

Для основности шлака 5 (рис. 1, б) количество серы в металле значительно ниже по сравнению с результатами ТМ для шлака с основностью 2 (рис. 1, а). При добавлении в шлак 1 % V_2O_3 и температуре 1600 °C степень десульфурации металла достигает 98,7 % и обеспечивает содержание серы на уровне 0,00036 %. Увеличение количества V_2O_3 в шлаке до 4 % повышает содержание серы в металле до 0,001 %, что соответствует степени десульфурации металла 96,3 %. Повышение температуры процесса десульфурации металла способствует снижению содержания серы в нем.

Важно отметить, что более благоприятные условия процесса десульфурации металла обеспечивает шлак без V_2O_3 по сравнению с борсодержащим. Шлаки с

Химический состав шлака

Chemical composition of the slag

Номер шлака	Содержание, % (по массе)					Основность шлака
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	
1	50,7	25,3	8	15	1	2
2	48,7	24,3	8	15	4	2
3	57	19	8	15	1	3
4	63,4	12,6	8	15	1	5
5	61,8	12,2	8	15	3	5
6	60,8	12,2	8	15	4	5
7	51,5	25,5	8	15	0	2
8	58,8	18,2	8	15	0	3
9	64,3	12,7	8	15	0	5

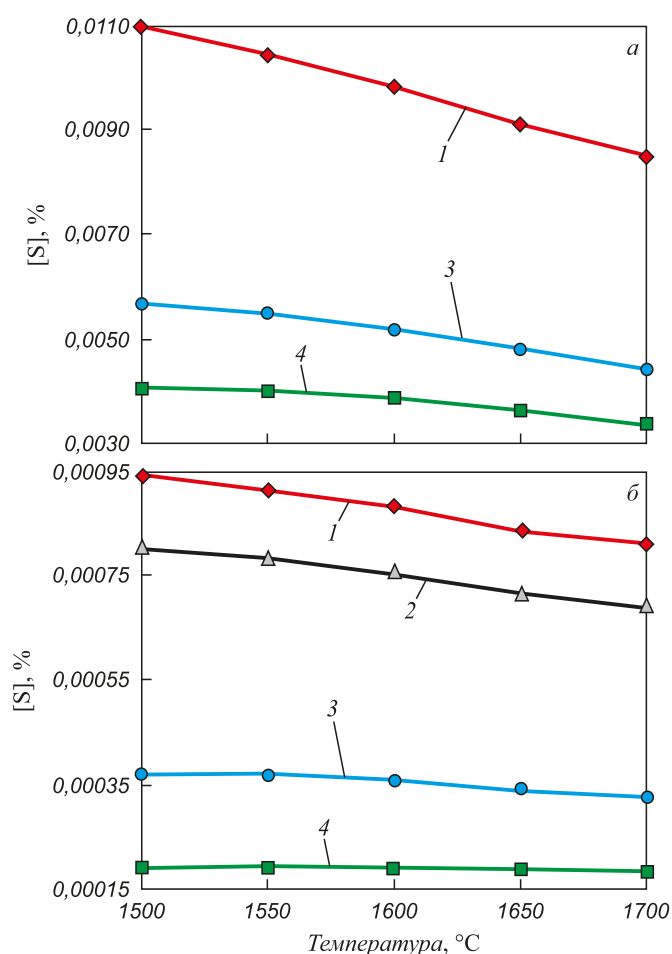


Рис. 1. Изменение содержания серы в металле в зависимости от температуры и содержания B_2O_3 в шлаке при его основности 2 (а) и 5 (б):
1 – 4 % B_2O_3 ; 2 – 3 % B_2O_3 ; 3 – 1 % B_2O_3 ; 4 – без B_2O_3

Fig. 1. Change in sulfur content in metal depending on temperature and content of B_2O_3 in slag with its basicity of 2 (a) and 5 (b):
1 – 4 % B_2O_3 ; 2 – 3 % B_2O_3 ; 3 – 1 % B_2O_3 ; 4 – without B_2O_3

основностью 2 и 5 без B_2O_3 (рис. 1, а, б) согласно результатам ТМ позволили получить металл при температуре 1600 °С с содержанием серы 0,0039 и 0,00019 % соответственно.

Полученные результаты расчета ТМ процесса десульфурации металла борсодержащими шлаками системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-B_2O_3$ основностью 2 – 5 в интервале температур 1500 – 1700 °С коррелируют с данными экспериментальных исследований и могут иметь практическое значение в сталеплавильном производстве.

Выводы. Результаты термодинамического моделирования процесса десульфурации металла борсодержащими шлаками системы $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-B_2O_3$ с применением программного комплекса HSC 6.12 Chemistry (Outokumpu) показали, что увеличение температуры процесса десульфурации металла с 1500 до 1700 °С способствует снижению содержания серы в изученном диапазоне основности шлака; повышение

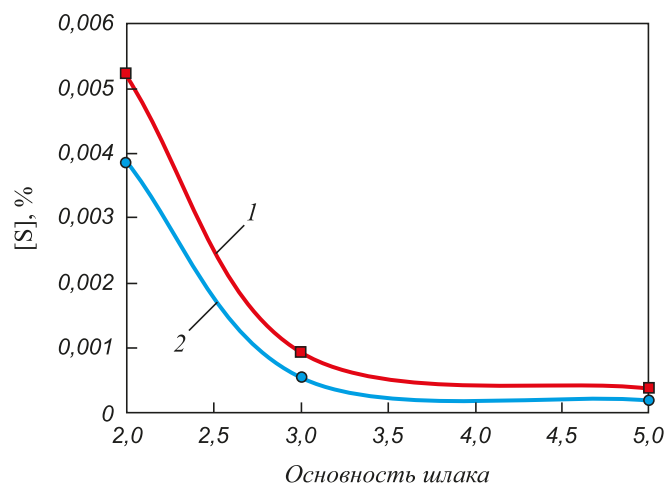


Рис. 2. Изменение содержания серы в металле в зависимости от основности шлака и содержания B_2O_3 в нем при температуре 1600 °С:
1 – 1 % B_2O_3 ; 2 – без B_2O_3

Fig. 2. Change in sulfur content in metal depending on basicity of slag and content of B_2O_3 in it at temperature of 1600 °С:
1 – 1 % B_2O_3 ; 2 – without B_2O_3

основности шлака с 2 до 5 оказывает благоприятное влияние на степень десульфурации металла, увеличивая ее с 80,7 до 98,7 % соответственно при температуре 1600 °С; увеличение содержания B_2O_3 в шлаке с 1 до 4 % снижает его рафинирующие свойства независимо от основности. Результаты исследований могут быть использованы при совершенствовании технологии процесса десульфурации стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия стали. Учебник для вузов / В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев и др. – М.: Металлургия, 1983. – 584 с.
2. Чуйко Н.М., Чуйко А.Н. Теория и технология электроплавки стали. – Киев-Донецк: Головное изд-во, 1983. – 248 с.
3. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. – Магнитогорск: изд. МТГУ, 2000. – 544 с.
4. Каблуковский А.Ф. Производство электростали и ферросплавов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 511 с.
5. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Внепечная металлургия стали. – М.: Теплотехник, 2010. Т. 3. – 544 с.
6. Новиков В.А., Царев В.А., Новиков С.В., Афанасьев С.Ю., Батов Ю.М. Термодинамические и кинетические особенности процесса десульфурации // Электromеталлургия. 2012. № 9. С. 16 – 20.
7. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
8. Wang H., Zhang T., Zhu H., Li G., Yan Y., Wang J. Effect of B_2O_3 on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO -based refining flux // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No 5. P. 702 – 706.
9. Турсунов Н.К., Семин А.Е., Саноккулов Э.А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшей обработкой в ковше с использованием редкоземельных металлов // Черные металлы. 2017. № 1. С. 33 – 40.

10. Акбердин А.А., Ким А.С., Есенжулов А.Б. Теоретическая оценка и промышленная проверка технологии выплавки рафинированного феррохрома с использованием легкоплавких флюсов: Сб. трудов Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», посвященной 110-летию со дня рождения академика А.М. Самарина. – М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 69.
11. Возчиков А.П., Демидов К.Н., Смирнов Л.А. и др. Разработка борсодержащих высокомагнезиальных флюсов рационального состава для сталеплавильного производства и экспериментальная оценка их физико-химических и рафинирующих свойств // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 11. С. 35 – 38.
12. Zhu Z.X., Li G.R., Wang H.M., Dai Q.X., Li B. // J. Univ. Sci. Technol. 2006. Bd. 28. S. 725.
13. Жарменов А.А., Муқанов Д.М., Акбердин А.А. и др. Комплексная переработка минерального сырья Казахстана // Бор в процессах подготовки и металлургической переработки железорудного сырья. – Астана: Фолиант, 2003. Т. 3. С. 3 – 87.
14. Kim Gi Hyun, Sohn H. Role of B_2O_3 on the viscosity and structure in the $CaO-Al_2O_3-Na_2O$ -based system // Metallurgical and Materials Transaction. 2014. Vol. 45. № 1. P. 86 – 95.
15. Kim Youngjae, Morita Kazuki. Relationship between molten oxide structure and thermal conductivity in the $CaO-SiO_2-B_2O_3$ system // ISIJ International. 2014. Vol. 54. № 9. P. 2077 – 2083.
16. Сычев А.В., Салина В.А., Бабенко А.А., Жучков В.И. Изучение межфазного распределения бора между борсодержащим оксидом и металлом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. С. 140 – 144.
17. Wan Yong, Chen Weiqing. 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. P. 574 – 579.
18. Величко О.Г., Камкіна Л.В., Манідін В.С., Ісава Л.Є., Червоний І.Ф. Роль бору в процесі отримання якісної сталі і проблеми його визначення // Теорія і практика металургії. 2015. № 1-2. С. 104 – 108.
19. Богданов Н.А., Сычков А.Б., Деревянченко И.В. и др. Разработка и освоение производства борсодержащих сталей // Металлург. 1999. № 2. С. 29, 30.
20. Жучков В.И., Сычев А.В., Акбердин А.А., Трофимов Е.А., Салина В.А., Бабенко А.А. Исследование и совершенствование процесса получения комплексных борсодержащих ферросплавов. Сб. материалов XVI Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали». – Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2015. Ч. 2. С. 191 – 196.
21. Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Бабенко А.А., Сычев А.В., Акбердин А.А. Перспективные направления использования борсодержащих материалов в черной металлургии: Сб. трудов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – Екатеринбург: Уральское отделение Российской академии наук, 2016. Т. 3. С. 73.
22. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. – Pori: Outokumpu research OY, 2002.

Поступила 30 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 12, pp. 955–959.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE PROCESS OF METAL DESULPHURATION BY BORON CONTAINING SLAGS OF THE $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-B_2O_3$ SYSTEM

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

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Thermodynamic modeling of process of metal desulphurization with boron-containing slags of the $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-B_2O_3$ system was carried out using HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu) software. Influence of process temperature (1500-1700 °C), basicity of slag (2 – 5) and content of B_2O_3 (1 – 4 %) on desulphurization of steel was studied. It was established that increase in temperature of metal desulphurization process from 1500 °C to 1700 °C helps to reduce sulfur content in the studied range of slag basicity. At temperature of 1600 °C, sulfur content in metal was 0.0052 % for slag basicity of 2, and at 1650 °C its concentration was 0.0048 %. Increase in basicity of slag from 2 to 5 had encouraging effect on the degree of metal desulfurization, increasing it from 80.7 to 98.7 %, respectively, at temperature of 1600 °C. At the same time, an increase in B_2O_3 concentration in slag had a negative effect on the process of metal desulfurization. Slag with basicity of 2, containing 1 and 4 % of B_2O_3 , allowed to obtain the amount of sulfur in metal, 0.0052 % and 0.0098 % respectively at a temperature of 1600 °C, and slag with basicity of 5 with the same content of B_2O_3 at the same temperature provided the amount of sulfur in metal 0.00036 and 0.00088 %, respectively. It should be noted that more favorable conditions for metal desulphurization provided the slag without B_2O_3 oxide comparing with the boron containing one. Slag with basicity of 2 and 5 without B_2O_3 according to the results of thermodynamic modeling allowed to obtain metal at temperature of 1600 °C with sulfur content of 0.0039 and 0.00019 %, respectively. Results of calculation of thermodynamic modeling of metal desulphurization process with boron-containing slags of $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-B_2O_3$ system with basicity of 2 – 5 in temperature range of 1500 – 1700 °C correlate with experimental

data and can apply to improving technology of steel desulphurization with boron-containing slags in steelmaking industry.

Keywords: thermodynamic modeling, boron-containing slag, steel, temperature, basicity, desulphurization of steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-955-959

REFERENCES

1. Yavoiskii V.I., Kryakovskii Yu.V., Grigor'ev V.P., Nechkin Yu.M., Kravchenko V.F., Borodin D.I. *Metallurgiya stali. Uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of steel. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 584 p. (In Russ.).
2. Chuiko N.M., Chuiko A.N. *Teoriya i tekhnologiya elektroplavki stali* [Theory and technology of electric steel melting]. Kiev-Donetsk: Golovnoe izd-vo, 1983, 248 p. (In Russ.).
3. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgiya stali. Teoriya i tekhnologiya plavki stali. Uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of steel. Theory and technology of steel melting. Textbook for universities]. Magnitogorsk: MTGU, 2000, 544 p. (In Russ.).
4. Kablukovskii A.F. *Proizvodstvo elektrostali i ferrosplavov* [Production of electric steel and ferroalloys]. Moscow: Akademkniga, 2003, 511 p. (In Russ.).
5. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Steel production. Out-of-furnace metallurgy of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, vol. 3, 544 p. (In Russ.).
6. Novikov V.A., Tsarev V.A., Novikov S.V., Afanas'ev S.Yu., Batov Yu.M. Thermodynamic and kinetic features of desulphurization process. *Elektrometallurgiya*. 2012, no. 9, pp. 16–20. (In Russ.).
7. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovanie stali* [Out-of-furnace refining of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).

8. Wang H., Zhang T., Zhu H., Li G., Yan Y., Wang J. 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.
9. Tursunov N.K., Semin A.E., Sanokulov E.A. Research of dephosphorization and desulfurization processes in smelting of 20GL steel in an induction crucible furnace with further processing in a ladle using rare earth metals. *Chernye metally*. 2017, no. 1, pp. 33–40. (In Russ.).
10. Akberdin A.A., Kim A.S., Esenzhulov A.B. Theoretical evaluation and industrial verification of smelting technology for refined ferrochromium using low-melting fluxes. In: *Sb. trudov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fiziko-khimicheskie osnovy metallurgicheskikh protsessov", posvyashchennaya 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.M. Samarina* [Papers of the Int. Sci. Conf. "Physical and Chemical Foundations of Metallurgical Processes" dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A.M. Samarin]. Moscow: IMET RAN, 2012, p. 69. (In Russ.).
11. Vozchikov A.P., Demidov K.N., Smirnov L.A. etc. Development of boron-containing high-magnesia fluxes of rational composition for steelmaking and experimental evaluation of their physico-chemical and refining properties. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 11, pp. 35–38. (In Russ.).
12. Zhu Z.X., Li G.R., Wang H.M., Dai Q.X., Li B. *J. Univ. Sci. Technol.* 2006, bd. 28, p. 725.
13. Zharmenov A.A., Mukanov D.M., Akberdin A.A. etc. Complex processing of mineral raw materials in Kazakhstan. In: *Bor v protsessakh podgotovki i metallurgicheskoi pererabotki zhelezorudnogo syr'ya* [Boron in the processes of preparation and metallurgical processing of iron ore]. Astana: Foliant, 2003, vol. 3, pp. 3–87. (In Russ.).
14. Kim Gi Hyun, Sohn Il. Role of B₂O₃ on the viscosity and structure in the CaO-Al₂O₃-Na₂O-based system. *Metallurgical and Materials Transaction*. 2014, vol. 45, no. 1, pp. 86–95.
15. Kim Youngyae, Morita Kazuki. Relationship between molten oxide structure and thermal conductivity in the CaO-SiO₂-B₂O₃ system. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 9, pp. 2077–2083.
16. Sychev A.V., Salina V.A., Babenko A.A., Zhuchkov V.I. Research of the boron interfacial distribution between boron-bearing oxide and metal. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 2, pp. 140–144. (In Russ.).
17. Wan Yong, Chen Weiqing. 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.
18. Velichko O.G., Kamkina L.V., Manidin V.S., Isava L.E., Chervonii I.F. The role of boron in processes of obtaining of steel of high quality and the problem of its determination. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2015, no. 1-2, pp. 104–108. (In Ukr.).
19. Bogdanov N.A., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Kucherenko O.L., Oleinik A.A., Parusov V.V., Starov R.V., Nesterenko A.M. Development and introduction of a technology for making boron-bearing steels. *Metallurgist*. 1999, vol. 43, no. 1-2, pp. 71–75. (In Russ.).
20. Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Akberdin A.A., Trofimov E.A., Salina V.A., Babenko A.A. Research and improvement of the process of obtaining of complex boron-containing ferroalloys. In: *Sb. materialov XVI Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy elektrometallurgii stali"* [Materials of the XVI Int. Conf. "Modern Problems of Electrometallurgy of Steel"]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2015, Part. 2, pp. 191–196. (In Russ.).
21. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Babenko A.A., Sychev A.V., Akberdin A.A. Advanced directions of using boron-containing materials in ferrous metallurgy. In: *Sb. trudov XX Mendeleevskogo s'ezda po obshchei i prikladnoi khimii* [Papers of the XXth Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2016, vol. 3, p. 73. (In Russ.).
22. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. *Pori: Outokumpu research OY*, 2002.

Acknowledgements. The study was financially supported by grant of the Russian Science Foundation (Project no. 16-19-10435).

Information about the authors:

V.A. Salina, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher*
(valentina_salina@mail.ru)
A.V. Sychev, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher* (ntm2000@mail.ru)
V.I. Zhuchkov, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher*
(ntm2000@mail.ru)
A.A. Babenko, *Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher*
(babenko251@gmail.com)

Received May 30, 2017