

УДК 669.187.28:539.55

ИЗУЧЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-25 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}^*$

Бабенко А.А.^{1,2}, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии
цветных металлов (babenko@gmail.com)

Жучков В.И.^{1,2}, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

Уполовникова А.Г.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (upol.ru@mail.ru)

Кель И.Н.¹, младший научный сотрудник

¹ Институт металлургии УрО РАН

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

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. Исследование влияния содержания оксида B_2O_3 и основности шлака на вязкость системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 25 % Al_2O_3 и 8 % MgO (здесь и далее указаны проценты по массе), было выполнено с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента, который позволяет получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции. Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных оксидов марки ЧДА. Составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплексов. Вязкость шлаков измеряли в молибденовых тиглях с помощью электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояния. Используя экспериментальные данные, построили математические модели, описывающие связь температуры заданной вязкости с составом оксидной системы. Затем совмещением полученных диаграмм состав – температура заданной вязкости на изотермический разрез диаграммы состав – вязкость получили совокупность изолиний вязкости. Обобщение результатов математического моделирования и графического отображения на изотермическом разрезе диаграммы состав – вязкость позволило получить новые данные о вязкости оксидной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 25 % Al_2O_3 и 8 % MgO в интервале основности от 2 до 5 и содержания 1 – 10 % B_2O_3 . Шлаки изучаемой оксидной системы в интервале температур 1400 – 1500 °С характеризуются низкой вязкостью. При температуре 1400 °С вязкость шлаков основностью 2,0 – 2,5, содержащих 7 – 10 % B_2O_3 , не превышает 3 – 4 Пз. Смещение шлаков в область основности 3 – 5 сопровождается при снижении содержания оксида B_2O_3 до 2 – 6 % повышением вязкости шлаков до 12 Пз. Увеличение температуры до 1450 °С приводит к значительному снижению вязкости шлаков, которая в области основности 2 – 3 даже при содержании 4 % B_2O_3 не превышает 4 Пз и увеличивается до 6 Пз в области основности 3 – 5 и содержании 1 – 3 % B_2O_3 . При температуре 1500 °С вязкость шлаков в области основности 3 – 5 при содержании 1 – 4 % B_2O_3 не превышает 4 Пз.

Ключевые слова: борсодержащие шлаки, основность, вязкость, планирование эксперимента, диаграммы состав – вязкость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-820-825

Актуальность проблемы повышения качества готовой металлопродукции очевидна. Одним из факторов, регулирующих качественные показатели литых сплавов, является содержание серы в металле, снижение концентрации которой до 0,005 – 0,010 % позволяет уменьшить отсортировку заготовок по поверхностным дефектам (трещинам) в 5 – 10 раз и повысить производительность МНЛЗ за счет увеличения скорости разливки на 5 – 10 % без ухудшения микроструктуры литой заготовки [1].

Возможность глубокой десульфурации металла под высокоосновными шлаками определяется не только высокой химической активностью компонентов оксидной системы, но и обеспечением благоприятных кинетических условий перехода серы из металла в объем шлака. Кинетика процесса во многом зависит от вязкости ра-

финировочных шлаков, так как скорость диффузии компонентов шлака в первом приближении обратно пропорциональна его вязкости [2, 3].

Для обеспечения низкого содержания серы в стали процесс десульфурации металла осуществляют в сталеразливочных ковшах под шлаками системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с добавлением плавикового шпата [1, 3 – 11]. Однако экологическая вредность плавикового шпата в совокупности с формированием самораспадающихся шлаков значительно усугубляют экологическую обстановку. Для формирования жидкоподвижных высокоосновных шлаков часто взамен плавикового шпата используется оксид B_2O_3 [4, 12 – 14].

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния оксида бора и основности шлака на вязкость системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащей 25 % Al_2O_3 и 8 % MgO . Шлаки исследуемой системы характеризуются высокими рафинирующими свойствами

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-08-00185).

ми [4, 19, 20] и могут быть рекомендованы для их формирования на установке ковш-печь.

Рассмотрена оксидная система $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, содержащая 25 % Al_2O_3 и 8 % MgO . Для исследования влияния основности и содержания оксида B_2O_3 в шлаке на вязкость использовали симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента, который позволяет получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции [15 – 18]. При построении матрицы планирования эксперимента на переменные составляющие исследуемой оксидной системы наложены ограничения: $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2 - 5$; $\text{B}_2\text{O}_3 = 1 - 10$ %; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25$ %; $\text{MgO} = 8$ %. Математическая модель, описывающая связь температуры заданной вязкости с составом оксидной системы, была выбрана в виде приведенного полинома III степени.

Область варьирования составом шлака в системе $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ представлена в виде симплекса двумя концентрационными треугольниками $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, вершинами которого являются псевдокомпоненты Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 (рис. 1).

При планировании эксперимента концентрации псевдокомпонентов изучаемой оксидной системы выражаются в долях единицы, а исходных компонентов – в массовых процентах [15]. В табл. 1 приводится состав

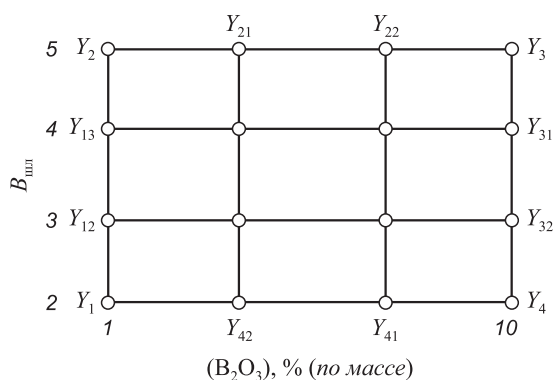


Рис. 1. План локального симплекса

Fig. 1. Plan of the local simplex

шлаков в вершинах симплекса, выраженный в координатах псевдокомпонентов и исходных компонентов.

Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам $Y_1 - Y_4$ изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных в течение двух-трех часов при температуре 900 °С (B_2O_3 при температуре 100 °С) оксидов марки ЧДА. Компоненты шлака перед загрузкой в тигель тщательно перемешивали. После расплавления шлак перемешивали в течение 0,5 ч с целью гомогенизации расплава. Экспериментальные составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса ($Y_{12} \dots Y_{132}$), получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса.

Вязкость шлаков измеряли в молибденовых тиглях с помощью электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояния. В качестве измерительного шпинделя применяли молибденовый стержень диам. 1,5 мм. Температуру шлака фиксировали с помощью термопары ПР 30/6. Химические составы получаемых шлаков в координатах псевдокомпонентов (в долях единицы) и исходных компонентов (в % по массе), а также значения вязкости при температурах 1400, 1500 и 1550 °С приведены в матрице планирования (табл. 2).

Для каждого значения вязкости в точках плана локального симплекса были получены математические модели в виде приведенного полинома III степени, адекватные при уровне значимости $\alpha = 0,05$, описывающие зависимость температуры заданной вязкости от состава шлака. Коэффициенты полиномов были рассчитаны по формулам, приведенным в работе [15]. Ниже в качестве примера приведена математическая модель зависимости температуры от состава шлака при постоянной вязкости 2 Пз для трехкомпонентной системы $Y_1 Y_2 Y_3$ (см. рис. 1):

$$T = 1500X_1 + 1680X_2 + 1520X_3 - 22,5X_1X_2 + 135X_1X_3 - 22,5X_2X_3 - 67,5X_1X_2(X_1 - X_2) + 180X_1X_3(X_1 - X_3) + 247,5X_2X_3(X_2 - X_3) + 630X_1X_2X_3,$$

Таблица 1

Состав шлака

Table 1. Slag composition

Индекс шлака	Состав шлака в координатах псевдокомпонентов, дол.ед.				Состав шлака в координатах исходных компонентов, % (по массе)				
	X_1	X_2	X_3	X_4	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	B_2O_3
Y_1	1	0	0	0	44	22	25	8	1
Y_2	0	1	0	0	55	11	25	8	1
Y_3	0	0	1	0	47,5	9,5	25	8	10
Y_4	0	0	0	1	38	19	25	8	10

Матрица планирования

Table 2. Planning matrix

№ смеси	Индекс шлака	В координатах псевдокомпонентов				Химический состав шлака, %, (по массе)					Вязкость, Пз, при T, °C			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	CaO	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	1400	1450	1500	1550
1	Y ₁	1	0	0	0	44,1	21,9	1	25	8	4,6	3,0	2,1	1,5
2	Y ₂	0	1	0	0	54,9	11,1	1	25	8	25	8,0	5,1	3,8
3	Y ₃	0	0	1	0	47,5	9,5	10	25	8	5,0	4,0	2,3	1,7
4	Y ₄	0	0	0	1	38,1	18,9	10	25	8	2,0	1,1	0,7	0,6
5	Y ₁₂	0,67	0,33	0	0	49,4	16,6	1	25	8	8,9	4,0	3,0	2,0
6	Y ₁₃	0,33	0,67	0	0	53,0	13,0	1	25	8	15,7	6,0	4,0	3,0
7	Y ₂₁	0	0,67	0,33	0	52,4	10,6	4	25	8	14,7	5,6	4,0	3,2
8	Y ₂₂	0	0,33	0,67	0	50,0	10,0	7	25	8	10,6	5,1	3,3	2,0
9	Y ₃₁	0	0	0,67	0,33	45,8	11,2	10	25	8	6,0	3,0	2,0	1,5
10	Y ₃₂	0	0	0,33	0,67	42,8	14,2	10	25	8	3,4	2,0	1,4	1,0
11	Y ₄₁	0,33	0	0	0,67	40,0	20,0	7	25	8	3,0	1,7	1,1	0,8
12	Y ₄₂	0,67	0	0	0,33	42,0	21,0	4	25	8	3,6	2,0	1,5	1,2
13	Y ₁₂₁	0,67	0	0,33	0	47,2	15,8	4	25	8	7,0	3,0	2,2	2,0
14	Y ₁₂₂	0,33	0	0,33	0,33	44,9	15,1	7	25	8	5,3	2,6	1,7	1,3
15	Y ₁₃₁	0,33	0,33	0,33	0	50,3	12,7	4	25	8	12,2	5,2	3,4	2,6
16	Y ₁₃₂	0,33	0	0,67	0	48,0	12,0	7	25	8	7,3	4,5	2,7	1,8

где X₁, X₂ и X₃ – состав шлака, выраженный в долях единицы.

Графическое изображение результатов математического моделирования проводили в два этапа. На первом этапе для каждого значения вязкости строили диаграммы, в которых изображались изотермы линий заданной постоянной вязкости. На рис. 2 в качестве примера приведен разрез диаграммы изотерм постоянной вязкости 2 Пз шлака системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащего 8 % MgO и 25 % Al₂O₃. Затем путем совмещения соответствующих изотерм, снимаемых со всех диаграмм постоянной вязкости, получали диаграммы состав – вязкость для исследуемого диапазона температур (рис. 3, а – в).

Обобщение экспериментальных данных и их графическое отображение на диаграммах состав – вязкость позволило впервые количественно оценить для исследуемой оксидной системы CaO–SiO₂–B₂O₃–25 % Al₂O₃–8 % MgO влияние температуры и химического состава шлака на его вязкость.

Присутствие оксида B₂O₃ в шлаках изучаемой оксидной системы обеспечивает в интервале температур 1400 – 1500 °C достаточно низкую вязкость. При температуре 1400 °C вязкость шлаков основностью 2,0 – 2,5, содержащих 7 – 10 % B₂O₃, изменяется в пределах 3 – 4 Пз. Рост основности шлака до 3 – 5 при фиксированном содержании B₂O₃ на уровне 7 – 10 %

сопровождается увеличением вязкости шлаков до 8 Пз и достигает 12 Пз при снижении содержания B₂O₃ до 2 – 6 % (рис. 3, а).

Увеличение температуры до 1450 °C и фиксированной основности 3 – 5 сопровождается значительным снижением вязкости, которая не превышает 5 Пз при

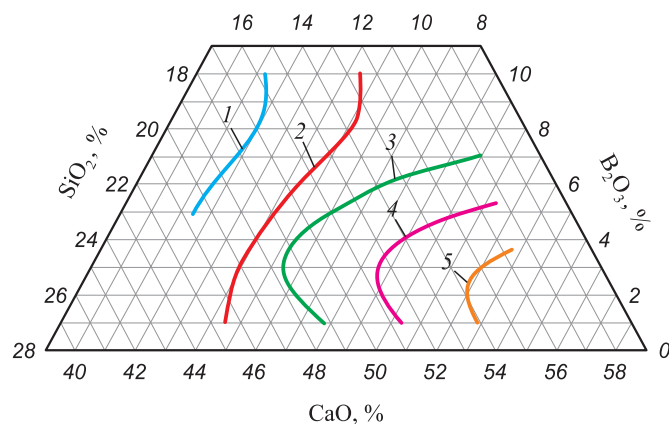


Рис.2. Диаграмма температур заданной вязкости 2 Пз шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащих 8 % MgO и 25 % Al₂O₃, °C: 1 – 1450; 2 – 1500; 3 – 1550; 4 – 1600; 5 – 1650

Fig. 2. Temperature diagram of the given viscosity of 2 Ps of slags of CaO–SiO₂–B₂O₃ system containing 8 % of MgO and 25 % of Al₂O₃ at °C: 1 – 1450; 2 – 1500; 3 – 1550; 4 – 1600; 5 – 1650

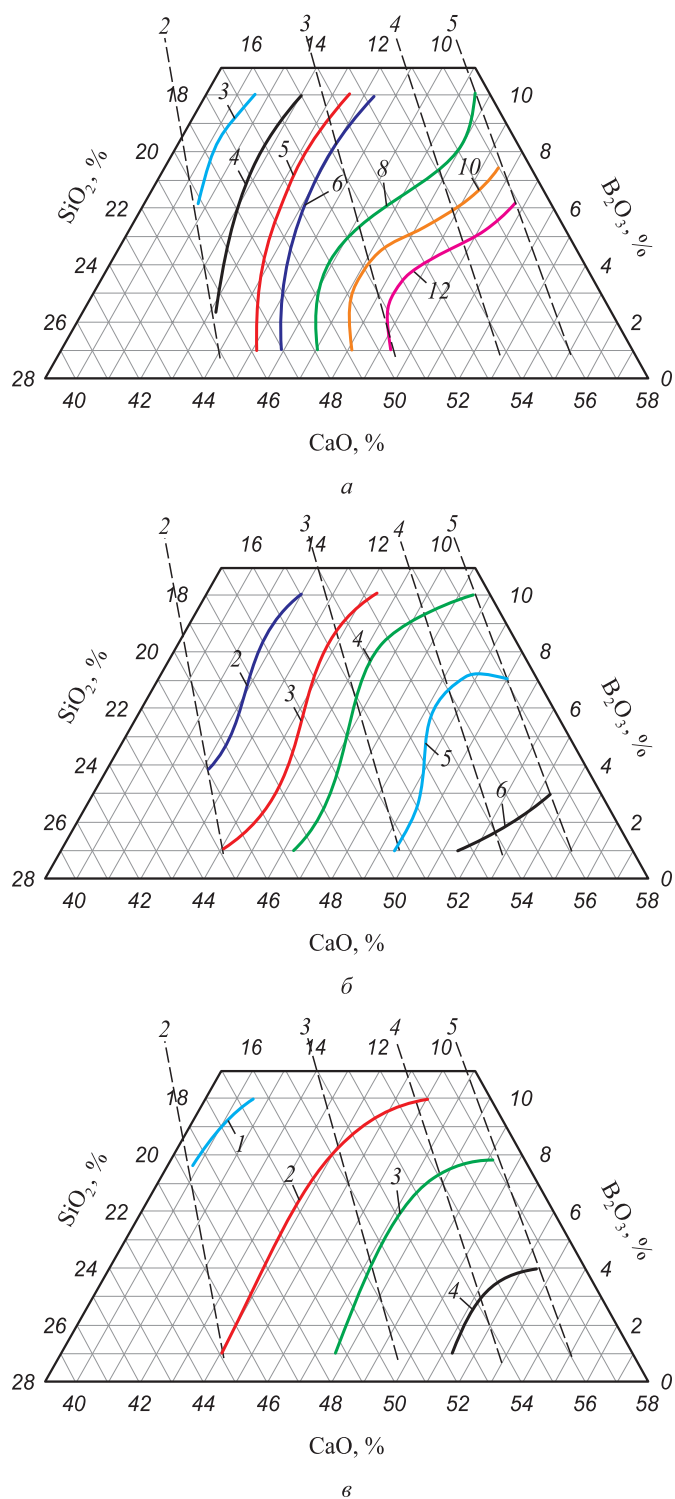


Рис.3. Диаграмма вязкостей шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащих 8 % MgO и 25 % Al₂O₃ при 1400 °C (а), 1450 °C (б) и 1500 °C (в) (сплошные линии – вязкость, Пз; штриховые – линии равной основности)

Fig.3. The viscosities diagram of the slag of CaO–SiO₂–B₂O₃ system containing 8 % of MgO and 25 % of Al₂O₃ at 1400 °C (a), 1450 °C (b) and 1500 °C (v) (solid lines – viscosity, P, dashed lines – equal basicity)

содержании 1 – 7 % B₂O₃. При увеличении концентрации B₂O₃ до 8 – 10 % вязкость шлаков в области основности 3 – 5 не превышает 3 – 4 Пз (рис. 3, б).

При температуре 1500 °C вязкость шлаков при фиксированных значениях основности 3 – 5 и содержании 8 – 10 % B₂O₃ уже не превышает 2 Пз и увеличивается до 4 Пз в диапазоне основности 4 – 5 и содержании 1 – 4 % B₂O₃ (рис. 3, в).

Выводы. Экспериментальные исследования в совокупности с математическим методом симплексных решеток планирования позволили с минимальными (16 опытов) затратами получить новые данные о вязкости шлаков системы CaO–SiO₂–B₂O₃, содержащей 25 % Al₂O₃ и 8 % MgO в широком диапазоне химического состава и температур. На диаграммах состав – вязкость шлаки основностью 2,0 – 5,0, содержащие 1 – 10 % B₂O₃, 25 % Al₂O₃ и 8 % MgO, характеризуются высокой жидкоподвижностью. Шлаки основностью 3 – 5, содержащие не более 4 % B₂O₃, характеризуются в диапазоне температур 1450 – 1500 °C низкой вязкостью, не превышающей 4 – 6 Пз, обладают высокими рафинирующими свойствами [4, 19, 20] и могут быть рекомендованы для формирования на установках ковшепечь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО «Северсталь» с учетом технологических аспектов: Труды VI конгресса сталеплавателей. – М.: АО «Черметинформация», 2001. С. 63 – 66.
2. Попель С.И. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
3. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
4. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of B₂O₃ on Melting Temperature, Viscosity and Desulfurization Capacity of CaO-based Refining Flux// ISIJ International. 2011. Vol. 51. № 5. Pp. 702 – 708.
5. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
6. Курпас В.И., Крупман Л.И., Бродский С.С. Усовершенствованная технология внепечного рафинирования стали: Сб. науч.-тех. статей из журнала «Сталь». – М.: Металлургия, 1987. С. 61 – 64.
7. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulphurisation technology in ladle furnace at KSC// Ironmaking and Steelmaking. 2003. Vol. 30. No. 2. Pp. 116 – 119.
8. Iwamasa P.K. and Fruehan R. J. Formation and behaviour of Mn containing oxysulphide inclusions during desulphurisation, deoxidation and alloying// Metall. Mater. Trans. 1997. B. 28. P. 47.
9. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J., Guo M., Blanpain B. Desulphurisation of Stainless Steel by Using CaO – Al₂O₃ Based Slags during Secondary Metallurgy// ISIJ International. Vol. 53 (2013). No. 3. Pp. 459 – 467.
10. Gaye H. and Lehmann J. Modeling and prediction of reactions involving metals, slags and fluxes. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. Pp. 619 – 624.
11. Hui-xiang Yu, Xin-hua Wang, Mao Wang, Wan-jun Wang Desulfurization ability of refining slag with medium basicity// Int. J. Miner. Metall. Mater. 2014. Vol. 21. No. 12. Pp. 1160 – 1166.
12. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Медведовская И.А. Влияние B₂O₃ на вязкость шлаков системы CaO–SiO₂–Al₂O₃ // Изв. АН СССР. Металлы. 1986. № 3. С. 55, 56.
13. Wang, H., Li G., Dai R. CAS-OB: refining slag modification with B₂O₃ – CaO and CaF₂ – CaO // Ironmaking and Steelmaking. 2007. Vol. 34. No. 4. С. 350 – 353.

14. Бабенко А.А., Истомин С.А., Протопопов Е.В., Сычев А.В., Рябов В.В. Вязкость шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 41 – 43.
15. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С. и др. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // Изв. вуз. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167.
16. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков: Методическое пособие / Ким В.А., Николай Э.И., Акбердин А.А., Куликов И.С. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 116 с.
17. Уполовникова А.Г., Бабенко А.А. Термодинамическое моделирование процессов восстановления бора из боросодержащих шлаков // Бултеровские сообщения. 2016. Т. 48. № 10. С. 114 – 118.
18. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А., Сычев А.В., Уполовникова А.Г. Использование метода симплексных решеток

для построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$ // Бултеровские сообщения. 2016. Т. 48. № 11. С. 40 – 44.

19. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А. и др. Исследование и разработка комплексной технологии производства низкоуглеродистой боросодержащей стали с низким содержанием серы // Сталь. 2015. № 11. С. 48 – 50.
20. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Жучков В.И. и др. Обработка технологии глубокой десульфурации металла и микролигирования стали бором на УКП под шлаками системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$: Сборник трудов XIII Международного конгресса сталеплавателей. – М. – Полевской: изд. «Ассоциация сталеплавателей», 2014. С. 174 – 177.

Поступила 7 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 10, pp. 820–825.

STUDY OF THE VISCOSITY OF SLAGS OF $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - 25\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ SYSTEM

Babenko A.A.^{1,2}, *Zhuchkov V.I.*^{1,2}, *Upolovnikova A.G.*¹,
*Kel' I.N.*¹

¹Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The effect of the B_2O_3 content and the slag basicity on the viscosity of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ system containing 25 % Al_2O_3 and 8 % MgO was studied using a simplex-lattice method of experiment planning that allows obtaining mathematical models describing the dependence of the property on the composition as a continuous function. Synthetic slags, corresponding to the composition of simplex under study, were smelted in graphite crucibles from pre-calcined oxides. The composition of slags, corresponding to the remaining points of the local simplex plan, was obtained by counter-packing the slags of simplexes. The viscosity of the slag was measured in molybdenum crucibles by means of an electrovibrational viscometer in an argon flow with continuous cooling of the melt from a homogeneous-liquid to a solid state. Mathematical models were constructed that describe the relationship between the temperature of a given viscosity and the composition of the oxide system using experimental data. Then, a set of viscosity isolines was obtained by combining the obtained composition-temperature diagrams of the given viscosity with the isothermal section of the composition-viscosity diagram. The generalization of mathematical modeling results and graphical imaging on the isothermal profile of the composition-viscosity diagram made it possible to obtain new data on the viscosity of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ oxide system containing 25 % Al_2O_3 and 8 % MgO in the basic 2 – 5 range and 1 – 10 % B_2O_3 content. The slags of the oxide system under study in the temperature range of 1400 – 1500 °C are characterized by low viscosity. At a temperature of 1400 °C, the viscosity of slag with basicity 2.0 – 2.5, containing 7 – 10 % B_2O_3 does not exceed 3 – 4 Ps. The displacement of the slag into the basicity of 3 – 5 is accompanied by a decrease in B_2O_3 content to 2 – 6 % by increasing the slag viscosity to 12 Ps. An increase in temperature to 1450 °C leads to a significant decrease in the viscosity of slags with basicity of 2 – 3, even for slag with B_2O_3 content of 4 %, it does not exceed 4 Ps and increases to 6 Ps in the basicity of 3 – 5 and B_2O_3 content of 1 – 3 %. The slag viscosity in the basicity of 3 – 5 at B_2O_3 content of 1 – 4 % does not exceed 4 Ps at a temperature of 1500 °C.

Keywords: boron containing slags, basicity, viscosity, experimental planning, composition-viscosity diagrams.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-820-825

REFERENCES

1. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D. Concept of production of low-sulfur steels at OAO Severstal, taking into account the technological aspects. In: *Trudy VI kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the Sixth Congress of Steelmakers]. Moscow: AO "Chermetinformatsiya", 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
2. Popel' S.I. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 463 p. (In Russ.).
3. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovaniye stali* [Out-of-furnace refining of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
4. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of B_2O_3 on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of CaO – based refining flux. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–708.
5. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. Tom 1. Protessy vyplavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Production of steel. Vol. 1. Processes of smelting, out-of-furnace processing and continuous casting]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 528 p. (In Russ.).
6. Kurpas V.I., Krupman L.I., Brodskii S.S. Improved technology of out-of-furnace refining of steel. *Stal'*. 1986, no. 2, pp.56–59 (In Russ.).
7. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulphurization technology in ladle furnace at KSC. *Ironmaking and Steelmaking*. 2003, vol. 30, no. 2, pp. 116–119.
8. Iwamasa P.K. and Fruehan R. J. Formation and behaviour of Mn containing oxysulphide inclusions during desulphurisation, deoxidation and alloying. *Metall. Mater. Trans.* 1997, vol. 28, 47 p.
9. Yan P., Guo X., Huang S., Dyck J., Guo M., Blanpain B. Desulphurisation of stainless steel by using $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ based slags during secondary metallurgy. *ISIJ International*, 2013, vol. 53, no. 3, pp. 459–467.
10. Gaye H. and Lehmann J. Modeling and prediction of reactions involving metals, slags and fluxes. *VII Int. Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, pp. 619–624.
11. Hui-xiang Yu, Xin-hua Wang, Mao Wang, Wan-jun Wang. Desulfurization ability of refining slag with medium basicity. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 2014, vol. 21, no. 12, pp. 1160–1166.
12. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Medvedovskaya I.A. Influence of B_2O_3 on the viscosity of slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ system. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1986, no. 3, pp. 55–56. (In Russ.).
13. Wang H., Li G., Dai R. CAS-OB refining: slag modification with $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ and $\text{CaF}_2 - \text{CaO}$. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, Issue 4, pp. 350–353.
14. Babenko A.A., Istomin S.A., Protopopov E.V., Sychev A.V., Ryabov V.V. Viscosity of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$ slag sys-

- tem. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
15. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. The use of simplex lattices method for charting structure - viscosity diagrams. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167–168. (In Russ.).
 16. Kim V. A., Nikolai E. I., Akberdin A. A., Kulikov I. S. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoistv metallurgicheskikh shlakov: metodicheskoe posobie* [Planning of experiment at the study of physical - chemical properties of metallurgical slags: Manual]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
 17. Upolovnikova A.G., Babenko A.A. Thermodynamic modeling of boron recovery from boron slags. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016, vol. 48, no. 10, pp. 114–118. (In Russ.).
 18. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Upolovnikova A.G. The use of simplex lattices method for constructing the composition-viscosity diagrams of the slags of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2016, vol. 48, no. 11, pp. 40–44. (In Russ.).
 19. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Akberdin A.A., Kim A.S., Vitushchenko M.F., Dobromilov A.A. Production technology for low-carbon, low-sulfur boron steel. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 883–886.
 20. Babenko A.A., Smirnov L.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N. Development of the technology of deep metal desulphurization and microalloying of steel by boron on ladle furnace under the slags of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ system. In: *Sbornik trudov XIII mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the 8th Int. Congress of Steelmakers]. Moscow-Polevskoy: izd. "Assotsiatsiya staleplavil'shchikov", 2014, pp. 174–177. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The study was financially supported by the RFBR grant (project no. 16-08-00185).
- Information about the authors:**
- Babenko A.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (babenko@gmail.com)
Zhuchkov V.I., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher
Upolovnikova A.G., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (upol.ru@mail.ru)
Kel' I.N., Junior Researcher

Received July 7, 2017