

УДК 669.046.582.5

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛАКОВ СИСТЕМЫ CaO–SiO₂–V₂O₃, СОДЕРЖАЩЕЙ 15 % Al₂O₃ И 8 % MgO*

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

Шартдинов Р.Р., младший научный сотрудник (russianpersen@mail.ru)

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

Сметанников А.Н., инженер-исследователь (artem.smetannikov.89@mail.ru)

Гуляков В.С., к.т.н., старший научный сотрудник

Институт металлургии УрО РАН

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

Аннотация. Методом симплексных решеток планирования эксперимента изучено влияние химического состава оксидной системы CaO–SiO₂–V₂O₃, содержащей 15 % Al₂O₃ и 8 % MgO на вязкость и температуру кристаллизации (здесь и далее указаны % (по массе)). Показано, что добавки оксида бора в шлаки изучаемой оксидной системы расширяют диапазон состава шлаков с низкой температурой кристаллизации и вязкостью. Шлаки основностью 2,0–3,0, содержащие 1–3 % V₂O₃, характеризуются низкой (1400–1450 °С) температурой кристаллизации и обладают высокой текучестью. Вязкость таких шлаков при их нагреве до 1550 и 1600 °С не превышает 0,20 и 0,15 Па·с соответственно. Увеличение содержания V₂O₃ до 4–6 % в шлаках основностью 2,0–3,0 сопровождается снижением температуры кристаллизации до 1350–1425 °С с сохранением низкой (не более 0,15 Па·с) вязкости при температуре нагрева системы 1550 и 1600 °С. Смещение формируемых шлаков, содержащих 1–6 % V₂O₃, в область повышенной до 3,0–5,0 основности сохраняет достаточно высокую их текучесть. При этом с ростом концентрации оксида бора явно прослеживается тенденция смещения изучаемой оксидной системы в область низких температур кристаллизации. Температура кристаллизации шлаков основностью 3,0–4,0, содержащих 6 % V₂O₃, достигает 1400 °С и практически не превышает 1475 °С для шлаков основностью 4,0–5,0, содержащих 1–2 % V₂O₃. При температуре 1600 °С вязкость шлаков изменяется от 0,15 Па·с при основности 3,0 и содержании оксида V₂O₃ 5–6 % до 0,25 Па·с при основности 4,0–5,0 и содержании оксида V₂O₃ 1–3 %. Снижение температуры исследуемой оксидной системы на 50 °С сопровождается незначительным (не более 0,05 Па·с) повышением вязкости.

Ключевые слова: вязкость, температура кристаллизации, планирование эксперимента, локальный симплекс, шлак, оксид бора, диаграмма состав – свойство.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-769-773

ВВЕДЕНИЕ

Важными физическими свойствами оксидных систем являются вязкость и температура кристаллизации, которые в значительной мере определяют скорости отдельных физико-химических процессов диффузионной области [1–4]. Например, скорость удаления серы из металла в шлак лимитируется скоростью ее транспортировки в оксидной системе и находится в обратно пропорциональной зависимости от вязкости оксидного расплава [2, 3]. Считается [5], что для обеспечения глубокой десульфурации металла вязкость шлаков достаточно поддерживать на уровне 0,15–0,30 Па·с. При этом, чем ниже температура кристаллизации оксидного расплава, тем выше степень перегрева его над температурой ликвидуса в диапазоне температур процессов, протекающих в сталеразливочном ковше на установке ковш–печь (УКП), и тем выше текучесть рафинировочных шлаков.

Оксидный расплав системы CaO–SiO₂–Al₂O₃ является основой шлаков ковшевой металлургии стали. Для

обеспечения низкой вязкости таких шлаков в качестве разжижающего флюса часто используют плавиковый шпат [1, 3, 6–11], который образует с ортосиликатом кальция легкоплавкую эвтектику и работает как деполимеризатор в силикатных системах, на короткое время снижает вязкость и температуру кристаллизации шлака. Однако в процессе высокотемпературной обработки металла шлаками системы CaO–SiO₂–Al₂O₃–CaF₂ образуются летучие фториды, что со временем изменяет состав рафинировочных шлаков и их физико-химические свойства. Экологическая вредность летучих фторидов и непостоянство физико-химических свойств формируемых шлаков вызывают необходимость проводить фундаментальные исследования физико-химических свойств оксидных безфтористых систем для ковшевой металлургии стали.

Одним из направлений решения этой проблемы является использование взамен плавикового шпата оксида бора, который, имея низкую температуру плавления, способен снизить температуру кристаллизации и значительно расширить диапазон химического состава шлаков с низкой вязкостью. При этом обеспечивается

* Работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

постоянство их физико-химических свойств в течение всего процесса обработки металла [12 – 16]. Однако, согласно исследованиям [17, 18] оксид бора имеет тенденцию действовать как типичный комплексообразующий оксид, увеличивает степень полимеризации структуры шлаков и может привести к увеличению вязкости. С увеличением основности шлака повышаются концентрации оксидов кальция и магния, обеспечивающие рост концентрации свободных ионов кислорода (O^{2-}), которые, реагируя с мостиковым кислородом в силикатах, упрощают сетчатую кремнекислородную структуру [17]. При этом с увеличением основности шлака, наряду с деполимеризацией сложной силикатной структуры, наблюдается изменение боратной структуры, когда свободные ионы кислорода взаимодействуют с мостиковым кислородом, соединяющим треугольники $[BO_3]$ и тетраэдры $[BO_4]$, и разрушают дибораты. Кроме того, когда простая двумерная структура $[BO_3]$ встраивается в сложную трехмерную силикатную структуру, значительно уменьшается ее симметрия, прочность и, как следствие, вязкость шлака [17].

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния химического состава на вязкость и температуру кристаллизации шлаков оксидной системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , представленные в виде диаграмм состав – свойство.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленной задачи использован метод симплексных решеток планирования эксперимента, который позволяет получать аналитическое выражение зависимости свойства от состава в виде непрерывной функции [19, 20]. При построении матрицы планирования эксперимента на переменные составляющие пятикомпонентной системы $CaO-SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3-MgO$ были наложены ограничения: $CaO/SiO_2 = 2,0 \div 5,0$; 0 – 6 % B_2O_3 ; 15 % Al_2O_3 ; 8 % MgO . Система аппроксимируется до трехкомпонентной смеси, так как содержание оксидов Al_2O_3 и MgO постоянно. Измерение вязкости шлаков (Пз) проводили на электровибрационном вискозиметре в графитовых тиглях. Температуру шлака фиксировали с помощью термопары ПР 30/6. Температуру кристаллизации (T_k) шлаков исследуемой оксидной системы определяли графически по перегибу кривой зависимости логарифма вязкости от обратной температуры. Экспериментальные данные приведены в таблице.

Математические модели, описывающие связь температуры кристаллизации и вязкости шлаков от состава, были выбраны в виде полиномов III степени. Коэффициенты полиномов находили по данным 16 экспериментов, выполненных в соответствии с матрицей планирования эксперимента, по формулам, приведенным в работах [19, 20]. По полученным моделям рассчитаны температура кристаллизации и вязкость шлаков во всем

Экспериментальные данные

Table 1. Experimental data

Номер смеси	Индекс шлака	Вязкость, Пз, при $T, ^\circ C$		$T_k, ^\circ C$
		1550	1600	
1	Y_1	1,7	1,4	1371
2	Y_2	4,1	3,2	1509
3	Y_3	2,4	2,1	1416
4	Y_4	1,0	0,8	1335
5	Y_{12}	2,1	1,9	1454
6	Y_{13}	3,2	2,5	1477
7	Y_{21}	3,4	2,8	1477
8	Y_{22}	2,7	2,3	1446
9	Y_{31}	2,1	1,6	1400
10	Y_{32}	1,4	1,2	1371
11	Y_{41}	1,2	1,1	1343
12	Y_{42}	1,5	1,2	1362
13	Y_{121}	2,0	1,8	1453
14	Y_{122}	1,7	1,6	1436
15	Y_{131}	2,5	2,2	1465
16	Y_{132}	2,4	2,0	1442

диапазоне составов и построены соответствующие диаграммы состав – свойство (рис. 1, 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных, отображенных в виде диаграмм состав – свойство, позволяет количественно оценить влияние температуры и химического состава на физические свойства шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO . Шлаки изучаемой оксидной системы, не содержащие оксида B_2O_3 , характеризуются повышенными температурой кристаллизации и вязкостью. Температура кристаллизации изменяется от 1400 °C при основности 2,1 до 1500 °C при основности 5,0 (рис. 1). Вязкость таких шлаков при температуре 1550 °C изменяется от 0,20 Па·с при основности шлака 2,5 до 0,40 Па·с при основности 5,0 (рис. 2, а) и уменьшается с повышением температуры до 1600 °C до 0,15 и 0,30 Па·с при пониженной до 2,1 и 4,3 основности (рис. 2, б).

Присутствие оксида B_2O_3 в шлаках изучаемой оксидной системы расширяет диапазон состава шлаков с низкими температурой кристаллизации и вязкостью. Шлаки основностью 2,0 – 3,0, содержащие 1 – 3 % B_2O_3 , характеризуются (рис. 1) низкой температурой кристаллизации, изменяющейся от 1400 до 1450 °C, и обладают высокой текучестью. Вязкость таких шлаков при их нагреве до 1550 и 1600 °C практически не превышает 0,20 и 0,15 Па·с соответственно (рис. 2). В шлаках основностью 2,0 – 3,0 увеличение содержа-

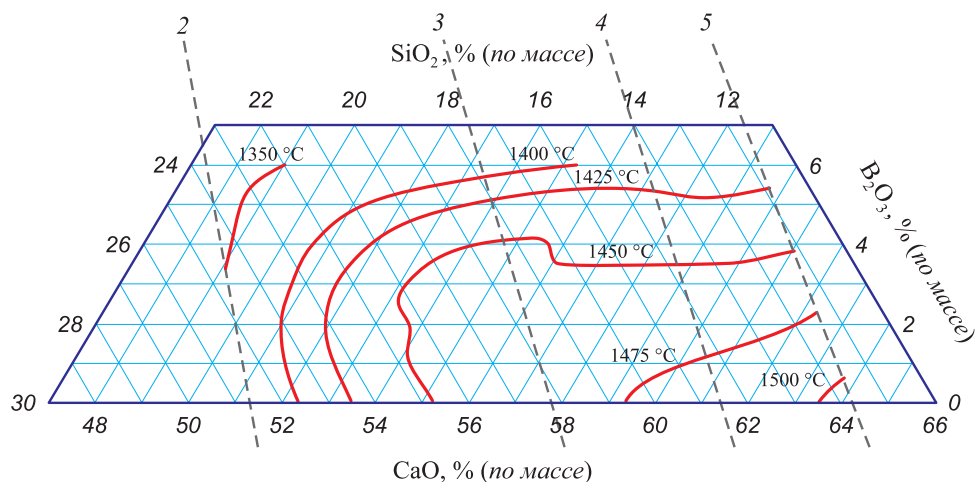
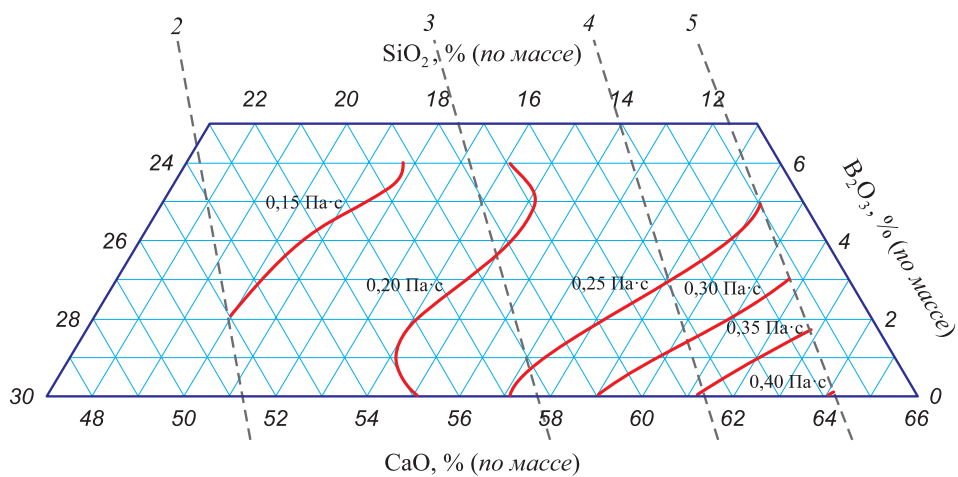
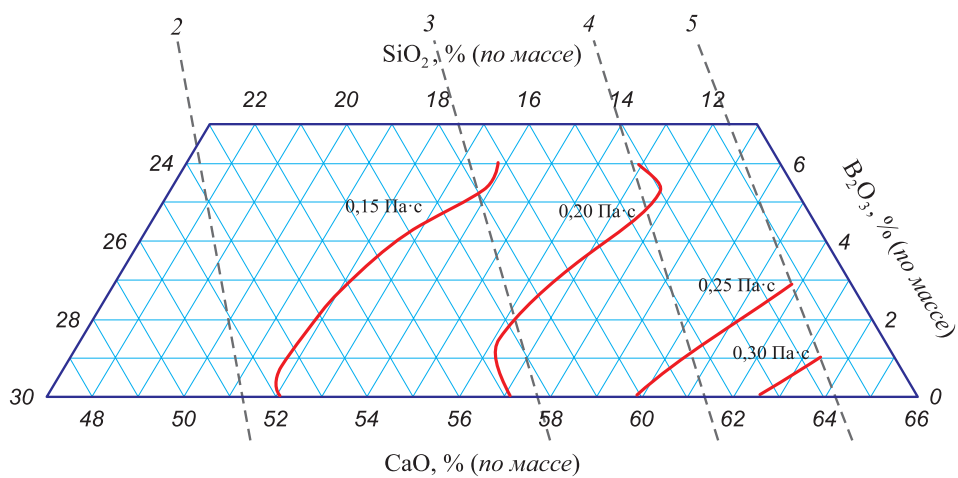


Рис. 1. Диаграмма состав – температура кристаллизации (T_k) шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO (— — T_k , °C; - - - — линии равной основности)

Fig. 1. Composition-crystallization temperature diagram for slags of $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system, containing 15 % of Al_2O_3 and 8 % of MgO (— — T_k , °C; - - - — lines of equal basicity)



a



b

Рис. 2. Диаграмма вязкости шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO при 1550 °C (a) и 1600 °C (б) (— — вязкость, Па·с; - - - — линии равной основности)

Fig. 2. Viscosity diagram for slags of $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system containing 15 % of Al_2O_3 and 8 % of MgO at 1550 °C (a) and 1600 °C (б) (— — viscosity, Pa·s; - - - — lines of equal basicity)

ния оксида B_2O_3 до 4 – 6 % сопровождается снижением температуры кристаллизации до 1350 – 1425 °С (рис. 1) с сохранением низкой, не более 0,15 Па·с, вязкостью при температурах нагрева системы 1550 и 1600 °С (рис. 2).

Смещение формируемых шлаков, содержащих 1 – 6 % B_2O_3 , в область повышенной до 3,0 – 5,0 основности сохраняет достаточно высокую их текучесть. При этом с ростом концентрации оксида B_2O_3 явно прослеживается тенденция смещения изучаемой оксидной системы в область низкой температуры кристаллизации. Температура кристаллизации шлаков основностью 3,0 – 4,0, содержащих 6 % B_2O_3 , достигает 1400 °С и практически не превышает 1475 °С для шлаков основностью 4,0 – 5,0, содержащих 1 – 2 % B_2O_3 (рис. 1). При температуре 1600 °С вязкость таких шлаков изменяется от 0,15 Па·с при основности 3,0 и содержании 5 – 6 % B_2O_3 до 0,25 Па·с при основности 4,0 – 5,0 при содержании B_2O_3 на уровне 1 – 3 % (рис. 2, б). Снижение температуры исследуемой оксидной системы на 50 °С сопровождается незначительным (не более 0,05 Па·с) повышением вязкости.

Выводы

Экспериментальные исследования физических свойств шлаков системы $CaO-SiO_2-B_2O_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , с использованием метода симплексных решеток планирования позволили получить новые данные о температуре кристаллизации и вязкости шлаков изучаемой оксидной системы, представленные в виде диаграмм состав – свойство. Оксид бора является эффективным средством регулирования физических свойств шлаков изучаемой оксидной системы. Формирование шлаков, содержащих 1 – 6 % B_2O_3 , в области основности 2,0 – 5,0 обеспечивает высокую их текучесть в диапазоне температур 1550 – 1600 °С. Температура кристаллизации таких шлаков изменяется в пределах 1350 – 1475 °С, обеспечивая вязкость изучаемой оксидной системы на уровне 0,15 – 0,30 Па·с. Приведенные диаграммы состав – свойство могут быть использованы в ковшевой металлургии для разработки оптимального химического состава рафинированных шлаков с высокими физико-химическими свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. В 3 т. Т. 3. Внепечная металлургия стали. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 с.
2. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. Учеб. пособие для студ. металлург. спец. вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.

3. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
4. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников, Л.А. Пронин, Е.С. Филиппов. – М.: Металлургия, 1988. – 511 с.
5. Явойский В.И., Явойский А.В. Научные основы современных процессов производства стали. – М.: Металлургия, 1987. – 184 с.
6. Wang H.M., Zhang T.W., Zhu H., Yan Y.Q., Zhao Y.N. Effect of B_2O_3 and CaF_2 on viscosity of ladle refining slag // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 295-297. P. 2647 – 2650.
7. Ko K.Y., Park J.H. Effect of CaF_2 addition on the viscosity and structure of $CaO-SiO_2-MnO$ slags // *ISIJ International*. 2013. Vol. 53. No. 6. P. 958 – 965.
8. Choi S.Y., Lee D.H., Shin D.W., Choi S.Y., Cho J.W., Park J.M. Properties of F-free glass system as a mold flux: viscosity, thermal conductivity and crystallization behavior // *Non-Cryst. Solids*. 2004. Vol. 345-346. P. 157 – 160.
9. Nakada H., Nagata K. Crystallization of $CaO-SiO_2-TiO_2$ slag as a candidate for fluorine free mold flux // *ISIJ Int*. 2006. Vol. 46. No. 3. P. 441 – 449.
10. Persson M., Seetharaman S., Seetharaman S. Kinetic studies of fluoride evaporation from slags // *ISIJ Int*. 2007. Vol. 47. No. 12. P. 1711 – 1717.
11. Физические свойства расплавов системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2-MgO-CaF_2$ / А.А. Акбердин, И.С. Куликов, В.А. Ким и др. – М.: Металлургия, 1987. – 144 с.
12. 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. P. 702 – 708.
13. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Медведовская И.А. Влияние B_2O_3 на вязкость шлаков системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ // *Известия АН СССР. Металлы*. 1986. № 3. С. 55, 56.
14. Бабенко А.А., Истомин С.А., Протопопов Е.В., Сычев А.В., Рябов В.В. Вязкость шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-B_2O_3$ // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 2. С. 41 – 43.
15. Wang Hong-ming, Li Gui-rong, Li Bo, Zhang Xue-jun, Yan Yong-qi. Effect of B_2O_3 on melting temperature of CaO -based ladle refining slag // *ISIJ International*. 2010. Vol. 17. No. 10. P. 18 – 22.
16. Wang H., Li G., Dai R. CAS-OB: refining slag modification with B_2O_3-CaO and CaF_2-CaO // *Ironmaking and Steelmaking*. 2007. Vol. 34. No. 4. P. 350 – 353.
17. Zhang Lei, Wang Wanlin, Xie Senlin, Zhang Kaixuan, Sohn H. Effect of basicity and B_2O_3 on the viscosity and structure of fluorine-free mold flux // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017. Vol. 460. No. 4. P. 113 – 118.
18. Sun Y.Q., Liao J.L., Zheng K., Wang X.D., Zhang Z.T. Effect of B_2O_3 on the Structure and Viscous Behavior of Ti-Bearing Blast Furnace Slags // *JOM*. 2014. Vol. 66. No. 10. P. 2168 – 2175.
19. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков. Методическое пособие / В.А. Ким, Э.Н. Николай, А.А. Акбердин и др. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 116 с.
20. 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, 168.

Поступила в редакцию 25 июня 2019 г.
После доработки 8 июля 2019 г.
Принята к публикации 8 июля 2019 г.

PHYSICAL PROPERTIES OF SLAGS OF CaO–SiO₂–B₂O₃ SYSTEM CONTAINING 15 % OF Al₂O₃ AND 8 % OF MgO

A.A. Babenko, R.R. Shartdinov, A.G. Upolovnikova,
A.N. Smetannikov, V.S. Gulyakov

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Influence of the chemical composition of CaO–SiO₂–B₂O₃ oxide system containing 15 % Al₂O₃ and 8 % MgO (in this expression and hereinafter indicated by mass %) on viscosity and crystallization temperature was studied using experiment method of simplex lattice planning. Addition of B₂O₃ to the slags of oxide system expands the range of slags composition with a low crystallization temperature and viscosity. Slags with a basicity of 2–3, containing 1–3 % of B₂O₃ are characterized by a low crystallization temperature, varying from 1400 to 1450 °C and have high flowability. The viscosity of such slags when heated to 1550 and 1600 °C does not exceed 0.20 and 0.15 Pa·s, respectively. An increase in B₂O₃ content to 4–6 % in slags with a basicity of 2–3 is accompanied by a decrease in crystallization temperature to 1350–1425 °C with keeping low, not more than 0.15 Pa·s, viscosity in the range of heating temperatures at 1550 and 1600 °C. The displacement of formed slags containing 1–6 % of B₂O₃ to the area of increased basicity up to 3–5 preserves their relatively high fluidity. In this case, with an increase in B₂O₃ concentration, there is a clear tendency for the studied oxide system to shift to the region of low crystallization temperatures. Crystallization temperature of slags with basicity of 3–4 containing 6 % of B₂O₃ reaches 1400 °C and practically does not exceed 1475 °C of slags with basicity of 4–5 containing 1–2 % of B₂O₃. At temperature of 1600 °C, the viscosity of such slags varies from 0.15 Pa·s with a basicity of 3 and a content of 5–6 % of B₂O₃ to 0.25 Pa·s in the basicity range of 4–5 with B₂O₃ content of 1–3 %. A decrease in temperature of the studied oxide system by 50 °C is accompanied by a slight (no more than 0.05 Pa·s) increase in viscosity.

Keywords: viscosity, crystallization temperature, experimental design, local simplex, slag, boron oxide, composition-property diagram.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-769-773

REFERENCES

- Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Steel production. Vol. 3. Ladle metallurgy of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
- Popel' S.I., Sotnikov A.I., Boronenkov V.N. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 463 p. (In Russ.).
- Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovanie stali* [Ladle refining of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
- Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashenninikov M.G., Pronin L.A., Filippov E.S. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh protsessov* [Physico-chemical methods in study of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).
- Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V. *Nauchnye osnovy sovremennykh protsessov proizvodstva stali* [Scientific basis of modern steel production processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 184 p. (In Russ.).
- Wang H.M., Zhang T.W., Zhu H., Yan Y.Q., Zhao Y.N. Effect of B₂O₃ and CaF₂ on viscosity of ladle refining slag. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 295-297, pp. 2647–2650.
- Ko K.Y., Park J.H. Effect of CaF₂ addition on the viscosity and structure of CaO–SiO₂–MnO slags. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 6, pp. 958–965.
- Choi S.Y., Lee D.H., Shin D.W., Choi S.Y., Cho J.W., Park J.M. Properties of F-free glass system as a mold flux: viscosity, thermal conductivity and crystallization behavior. *Non-Cryst. Solids*. 2004, vol. 345-346, pp. 157–160.
- Nakada H., Nagata K. Crystallization of CaO–SiO₂–TiO₂ slag as a candidate for fluorine free mold flux. *ISIJ Int.* 2006, vol. 46, no. 3, pp. 441–449.
- Persson M., Seetharaman S., Seetharaman S. Kinetic studies of fluoride evaporation from slags. *ISIJ Int.* 2007, vol. 47, no. 12, pp. 1711–1717.
- Akberdin A.A., Kulikov I.S., Kim V.A. etc. *Fizicheskie svoystva rasplavov sistemy CaO–Al₂O₃–SiO₂–MgO–CaF₂* [Physical properties of the melts of CaO–Al₂O₃–SiO₂–MgO–CaF₂ system]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 144 p. (In Russ.).
- 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, no. 5, pp. 702–708.
- Akberdin A.A., Kireeva G.M., Medvedovskaya I.A. Effect of B₂O₃ on viscosity of the slags of CaO–Al₂O₃–SiO₂ system. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1986, no. 3, pp. 55–56. (In Russ.).
- Babenko A.A., Istomin S.A., Protopopov E.V., Sychev A.V., Ryabov V.V. Viscosity of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–B₂O₃ slag system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
- Wang Hong-ming, Li Gui-rong, Li Bo, Zhang Xue-jun., Yan Yong-qi. Effect of B₂O₃ on melting temperature of CaO-based ladle refining slag. *ISIJ International*. 2010, vol. 17, no. 10, pp. 18–22.
- 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, pp. 350–353.
- Zhang Lei, Wang Wanlin, Xie Senlin, Zhang Kaixuan, Sohn Il. Effect of basicity and B₂O₃ on the viscosity and structure of fluorine-free mold flux. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017, vol. 460, no. 4, pp. 113–118.
- Sun Y.Q., Liao J.L., Zheng K., Wang X.D., Zhang Z.T. Effect of B₂O₃ on the structure and viscous behavior of Ti-bearing blast furnace slags. *JOM*. 2014, vol. 66, no. 10, pp. 2168–2175.
- Kim V.A., Nikolai E.N., Akberdin A.A. etc. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoystv metallurgicheskikh shlakov. Metodicheskoe posobie* [Experiment planning in study of physicochemical properties of metallurgical slag. Method book]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
- Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. etc. Application of simplex lattice method for constructing composition-viscosity diagrams. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167–168. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed within the state assignment of IMET UB RAS.

Information about the authors:

A.A. Babenko, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher
(babenko251@gmail.com)

R.R. Shartdinov, Junior Researcher (russianpersen@mail.ru)

A.G. Upolovnikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(upol.ru@mail.ru)

A.N. Smetannikov, Research Engineer
(artem.smetannikov.89@mail.ru)

V.S. Gulyakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Received June 25, 2019

Revised July 8, 2019

Accepted July 8, 2019