

УДК 669.046.582.5

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА БОРА И ОСНОВНОСТИ НА ВЯЗКОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ

$\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-12\%\text{Cr}_2\text{O}_3-3\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO}$

© 2024 А. А. Бабенко, Р. Р. Шартдинов*, А. Г. Уполовникова, А. Н. Сметанников

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: rr.shartdinov@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.08.2024

После доработки 20.08.2024

Принята к публикации 27.08.2024

Бурный рост потребности в нержавеющей стали и, соответственно, ее производства, произошедший во второй половине XX века и не прекращающийся по сегодняшний день, делает необходимым проведение исследований свойств оксидных систем, которые способствуют совершенствованию технологий металлургического производства такой стали, поэтому в данной работе с использованием метода симплексных решеток планирования эксперимента и вибрационной вискозиметрии проведено исследование влияния основности и содержания оксида бора на вязкость и температуру начала кристаллизации шлаков оксидной системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-12\%\text{Cr}_2\text{O}_3-3\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO}$, формируемых в восстановительный период процесса производства низкоуглеродистой нержавеющей стали методом аргоно-кислородного рафинирования (АКР-процесс), который на текущий момент является основным способом производства коррозионно-стойкой стали. Ввод оксида бора в шлаки аргоно-кислородного рафинирования является возможным вариантом решения проблемы нестабильности физических свойств шлаков по ходу плавки, вызванной летучестью фторидов плавикового шпата, традиционно применяемого в качестве флюса — разжигателя, и соблюдения ужесточающихся экологических требований за счет исключения образования ядовитых соединений фтора. По результатам экспериментальных исследований вязкости шлаков изучаемой оксидной системы в зависимости от химического состава и температуры построены аппроксимирующие математические модели в виде приведенного полинома третьей степени. Графически результаты математического моделирования представлены в виде диаграмм «состав — свойство», которые позволяют количественно определить влияние температуры и химического состава исследуемых шлаков на вязкость и их состава на температуру начала кристаллизации. Отмечено, что при 1600 и 1650°C увеличение содержания оксида бора в шлаке с 3 до 6% благоприятно сказывается на жидкоподвижности формируемых шлаков в диапазоне основности 1.0–2.5. Например, увеличение концентрации оксида бора с 3 до 6% обеспечивает снижение вязкости шлаков с 2.0 до 0.5 Па·с при температуре 1600°C и с 0.4 до 0.3 Па·с при температуре 1650°C в области повышенной до 2.0–2.5 основности.

Ключевые слова: АКР-процесс, нержавеющая сталь, восстановительный период, шлак, оксиды бора и хрома, вязкость, температура начала кристаллизации

DOI: 10.31857/S0235010624050047

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день производство низкоуглеродистой нержавеющей стали достаточно широко распространено в мире и представлено большим числом марок стали, которые находят широкое применение в химической, энергетической, фармацевтической промышленности, а также в строительстве и быту. Причем спрос на нее постоянно растет, и в период с 1950 по 2022 год ее производство выросло с 1.0 до 58.3 млн т, опережая темпы роста производства углеродистой стали [1]. Важнейшим легирующим элементом для нержавеющей сталей является Cr, который частично окисляется в ходе операции обезуглероживания стали. Шлаки, насыщенные Cr_2O_3 , отличаются повышенной вязкостью и при росте содержания Cr_2O_3 с 5 до 20% она возрастает с 0.5 до 5.0 Па·с [2]. Содержание оксида хрома в шлаках производства нержавеющей стали может достигать 18% и более, поэтому традиционно в ходе формирования хромосодержащих шлаков в качестве разжижителя используют плавиковый шпат, который с оксидом кальция образует двойную систему с эвтектической температурой плавления 1360°C. Добавка плавикового шпата в систему $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ приводит к снижению вязкости, что подтверждается результатами исследований, приведенных в работах [3, 4]. Однако, в связи с высокой летучестью фторидов при температурах выплавки стали, воздействие плавикового шпата на физико-химические характеристики шлаков носит краткосрочный характер [5–8], а выделяющиеся соединения фторидов негативно воздействуют на окружающую среду, что делает плавиковый шпат экологически вредной присадкой [6].

Одним из вариантов решения проблемы изменения физических свойств шлаков по ходу плавки и соблюдения ужесточающихся экологических требований является разработка составов шлаков, в которых в качестве разжижителя вместо плавикового шпата выступает оксид бора. Оксид бора отличается низкой температурой плавления и склонностью к образованию легкоплавких эвтектик с основными компонентами шлака, например, $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ с температурой плавления 1130°C. Его применение понижает температуру кристаллизации шлака, расширяет интервал температур с низкой вязкостью, за счет чего обеспечивается раннее наведение шлака и постоянство его свойств в течение выплавки металла, что отмечено в работах авторов [2, 9–18], изучающих влияние оксида бора на физико-химические свойства доменных шлаков, шлаков внепечной обработки и шлаков, используемых при непрерывной разливке (ШОС) и пр.

Из-за сложностей, сопровождающих процесс измерения вязкости хромосодержащих шлаков (высокие температуры плавления шлаков, длительность экспериментов и их сложность), опубликованных данных о вязкости хромосодержащих шлаков достаточно мало. При этом практически отсутствуют публикации, описывающие влияние оксида бора на вязкость хромосодержащих шлаков.

В статье для изучения влияния оксида бора и основности на вязкость хромосодержащих шлаков выбрана оксидная система $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-12\%Cr}_2\text{O}_3\text{-3\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$, содержащая 3.0–6.0% оксида бора с основностью (CaO/SiO_2) , изменяющейся в диапазоне 1.0–2.5.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение зависимости вязкости шлаков от их химического состава и температуры проводили с использованием метода симплексных решеток планирования эксперимента, сущность которого заключается в построении математической модели в виде приведенного полинома III степени [19]. Для исследования вязкости и температуры начала кристаллизации оксидной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-12\%Cr}_2\text{O}_3\text{-3\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$ были сформированы шлаки, соответствующие составу матрицы планирования эксперимента (таблица 1).

Базовые шлаки Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 выплавлялись в печи сопротивления в Мо-тиглях в атмосфере аргона из прокаленных в муфельной печи в течение 3 часов при 800°C (B_2O_3 при 100°C) оксидов марки ч.д.а. После полного расплавления шлаки выдерживались в течение 30 минут и быстро охлаждались. Промежуточные шлаки №5 (Y_{12})—№16 (Y_{132}) формировали «встречной шихтовкой» путем смешения базовых шлаков, исходя из соотношений, указанных в таблице 1. Вязкость расплавленных

Таблица 1. Состав экспериментальных шлаков, содержащих 12% Cr_2O_3 , 8% MgO и 3% Al_2O_3

№	Индекс шлака	Состав шлака							В
		в координатах псевдо-компонентов, дол.				в координатах исходных компонентов, масс.%			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	CaO	SiO ₂	B ₂ O ₃	
1	Y ₁	1	0	0	0	37.00	37.00	3.0	1.0
2	Y ₂	0	1	0	0	52.86	21.14	3	2.5
3	Y ₃	0	0	1	0	50.71	20.29	6.0	2.5
4	Y ₄	0	0	0	1	35.50	35.50	6	1.0
5	Y ₁₂	0.67	0.33	0	0	42.29	31.71	3	1.3
6	Y ₁₃	0.33	0.67	0	0	47.57	26.43	3	1.8
7	Y ₂₁	0	0.67	0.33	0	52.14	20.86	4.0	2.5
8	Y ₂₂	0	0.33	0.67	0	51.43	20.57	5.0	2.5
9	Y ₃₁	0	0	0.67	0.33	45.64	25.36	6	1.8
10	Y ₃₂	0	0	0.33	0.67	40.57	30.43	6	1.3
11	Y ₄₁	0.33	0	0	0.67	36.00	36.00	5	1.0
12	Y ₄₂	0.67	0	0	0.33	36.50	36.50	4	1.0
13	Y ₁₂₁	0.67	0	0.33	0	41.57	31.43	4	1.3
14	Y ₁₂₂	0.33	0	0.33	0.33	41.07	30.93	5	1.3
15	Y ₁₃₁	0.33	0.33	0.33	0	46.86	26.14	4	1.8
16	Y ₁₃₂	0.33	0	0.67	0	46.14	25.86	5	1.8

опытных образцов шлака измерялась посредством вибрационного вискозиметра [20] в молибденовых тиглях в атмосфере аргона при постепенном охлаждении печи сопротивления. Замер температуры производился при помощи W-Re термопары. Полученные данные, характеризующие зависимость вязкости шлаков от температуры, использовались для построения графиков в координатах $\ln \eta - 1/T$. Перелом политерм вязкости в данных координатах, согласно теории вязкого течения Френкеля, обозначает температуру начала кристаллизации шлаков [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графическое изображение результатов моделирования на тройных диаграммах «состав – свойство» состоит из двух этапов, поскольку вязкость шлаков зависит не только от их химсостава, но и температуры. На первом этапе по результатам экспериментальных исследований вязкости и температуры начала кристаллизации шлаков 16 точек плана локального симплекса (табл. 1) построены аппроксимирующие математические модели в виде приведенных полиномов III степени, описывающие влияние состава шлаков на температуру при постоянной вязкости. Пример диаграммы, содержащей изотермы линий постоянной вязкости 0.4 Па·с представлен на рис. 1. На следующем этапе совмещением соответствующих температур, снимаемых со всех диаграмм постоянной вязкости, строятся диаграммы

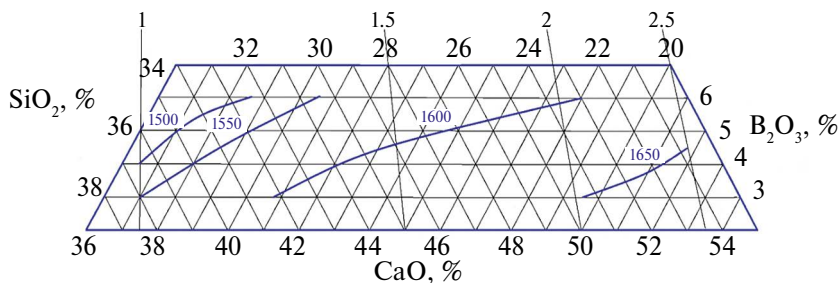


Рис. 1. Диаграмма заданной вязкости 0.4 Па·с шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-}12\%\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}3\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\%\text{MgO}$ при содержании B_2O_3 от 3 до 6% (синие линии – температура, °C; черные – линии основности).

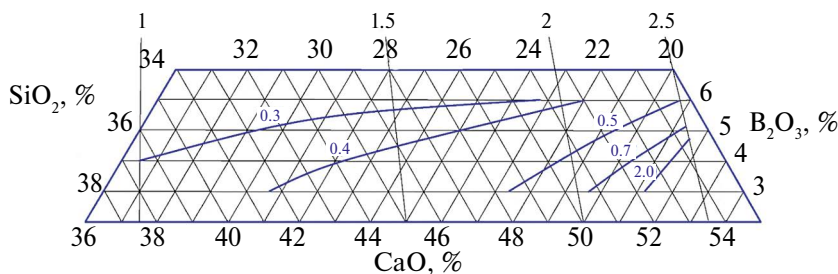


Рис. 2. Диаграмма состав-вязкость шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-}12\%\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}3\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\%\text{MgO}$ при содержании B_2O_3 от 3 до 6% и температуре 1600 °C. (синие линии – вязкость, Па·с; черные – основность).

состав-вязкость, которые представляют собой изотермический разрез (рис. 2–3). Температура начала кристаллизации зависит только от химсостава и поэтому диаграмма строится в один этап (рис. 4).

Видно (рис. 2), что при температуре 1600°C с ростом основности формируемого шлака с 1.0 до 2.5 в диапазоне концентрации оксида бора 3.0–6.0% наблюдается увеличение вязкости шлаков с 0.3 до 0.7 Па·с. При этом увеличение содержания оксида бора в шлаке с 3 до 6% благоприятно сказывается на жидкоподвижности формируемых шлаков. Например, увеличение концентрации оксида бора с 3 до 6% в шлаке основностью 2.0–2.5 сопровождается снижением его вязкости с 0.7 до 0.3 Па·с. При этом снижение концентрации оксида бора с 5 до 3% в области повышенной до 2.3–2.5 основности сопровождается повышением вязкости формируемого шлака до 2.0 Па·с. Это обусловлено, по-видимому, гетерогенизацией формируемого шлака с температурой начала кристаллизации 1600°C (рис. 4).

Увеличение температуры исследуемой оксидной системы до 1650°C в рассматриваемом диапазоне основности (2.0 – 2.5) рост концентрации оксида бора с 3–4 до 5–6% слабо влияет на вязкость, которая снижается с 0.4 до 0.3 Па·с, обеспечивая высокую жидкоподвижность формируемого шлака в рассматриваемом диапазоне основности и концентрации оксида бора (рис. 3).

На рисунке 4 представлена диаграмма «состав-температура начала кристаллизации» шлаков изучаемой оксидной системы. Видно, что в рассматриваемом

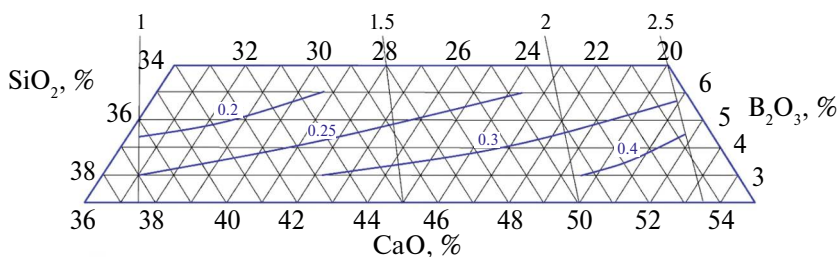


Рис. 3. Диаграмма состав-вязкость шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-}12\%\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}3\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\%\text{MgO}$ при содержании B_2O_3 от 3 до 6% и температуре 1650 °С. (синие линии – вязкость, Па·с; черные линии – линии основности).

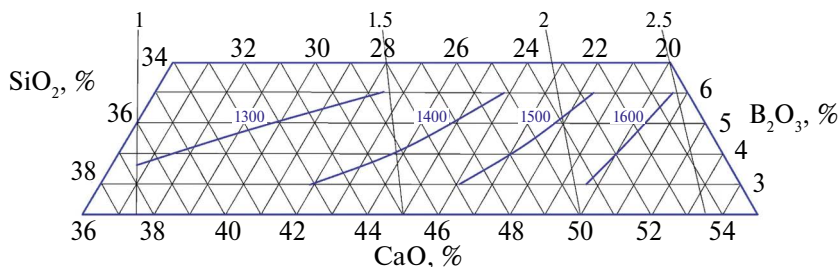


Рис. 4. Диаграмма состав-температура начала кристаллизации шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-}12\%\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}3\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\%\text{MgO}$ при содержании B_2O_3 от 3 до 6%. (синие линии – температура начала кристаллизации, Па·с; черные линии – основность).

диапазоне концентрации оксида бора (3–6%) с повышением основности формируемого шлаков с 1.0 до 2.5 температура начала кристаллизации увеличивается с 1300 до 1600°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием метода симплексных решеток планирования эксперимента и метода вибрационной вискозиметрии изучено влияние состава шлаков исследуемой оксидной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-12\%Cr}_2\text{O}_3\text{-3\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$, формируемой в восстановительный период АКР-процесса, на их вязкость и температуру начала кристаллизации. Обобщение результатов экспериментальных исследований позволило построить аппроксимирующие математические модели в виде приведенного полинома III степени с графическим отображением результатов математического моделирования в виде диаграмм «состав-свойство». Отмечено, что при 1600 и 1650°C увеличение содержания оксида бора в шлаке с 3 до 6% благоприятно сказывается на жидкоподвижности формируемых шлаков в диапазоне основности 1.0–2.5. Например, увеличение концентрации с 3 до 6% обеспечивает снижение вязкости шлаков с 2.0 до 0.5 Па·с при температуре 1600°C и с 0.4 до 0.3 Па·с в области повышенной до 2.0–2.5 основности. Температура начала кристаллизации при этом остается на уровне 1600°C.

Исследование выполнено за счет государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stainless Steel in Figures 2020 // ISSF. URL: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2020_English_public_version.pdf (дата доступа: 2024-06-06).
2. Атлас шлаков: справ. изд. Пер. с нем. Москва: Металлургия, 1985. 208 с.
3. F. Shahbazian, Du. Sichen, S. Seetharaman. The effect of addition of Al_2O_3 on the viscosity of $\text{CaO-FeO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ slags // ISIJ International. 2002. 42. № 2. P. 155–162.
4. J.H. Park, D.I. Min, H.S. Song. The effect of CaF_2 on the viscosities and structures of $\text{CaO-SiO}_2\text{-(MgO)-CaF}_2$ slags // Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. 33. № 5. P. 723–739.
5. Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рошин, В.П. Грибанов, А.В. Речкалова, А.А. Гайнуллин. Влияние SiO_2 на летучесть шлаков системы $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 8. С. 39–41.
6. Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко. Внепечная металлургия стали. Т.3. Москва: Теплотехник, 2010. 544 с.
7. А.А. Акбердин, И.С. Куликов, В.А. Ким, А.К. Надырбеков, А.С. Ким. Физические свойства расплавов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-CaF}_2$. М.: Металлургия, 1987. 144 с.
8. А.И. Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов. Физическая химия металлургических шлаков. М.: Интерконтакт, Наука, 2008. 352 с.
9. W. Hong-ming, L. Gui-rong, L. Bo, Z. Xue-jun, Y. Yong-qi. Effect of B_2O_3 on Melting temperature of CaO -Based Ladle Refining Slag // ISIJ International. 2010. 17. № 10. P. 18–22.
10. Бабенко А.А., Истомин С.А., Потопопов Е.В., Сычев А.В., Рябов В.В. Вязкость шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-B}_2\text{O}_3$ // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. 57. № 2. P. 41–43.

11. H.M. Wang, T.W. Zhang, H. Zhu, Y.Q. Yan, Y.N. Zhao. Effect of B_2O_3 and CaF_2 on viscosity of ladle refining slag // *Advanced Materials Research*. 2011. **295–297**. P. 2647–2650.
12. A.B. Fox, K.C. Mills, D. Lever, C. Bezerra, C. Valadares, I. Unamuno, J.J. Laraudogoitia, J. Gisby. Development of fluoride-free fluxes for billet casting // *ISIJ International* 2005. **45**. № 7. P. 1051–1058.
13. B.X. Lu, W.L. Wang, J. Li, H. Zhao, D.Y. Huang. Effects of Basicity and B_2O_3 on the Crystallization and Heat Transfer Behaviors of Low Fluorine Mold Flux for Casting Medium Carbon Steels // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. **44**. № 2. P. 365–377.
14. J. Wei, W.L. Wang, L.J. Zhou, D.Y. Huang, H. Zhao, F.J. Ma. Effect of Na_2O and B_2O_3 on the Crystallization Behavior of Low Fluorine Mold Fluxes for Casting Medium Carbon Steels // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. **45**. № 2. P. 643–652.
15. W. Wang, D. Cai, L. Zhang. A Review of Fluorine-free Mold Flux Development // *ISIJ International*. 2018. **58**. № 11. P. 1957–1964.
16. G.-R. Li, H.-M. Wang, Q.-X. Dai, Y.-T. Zhao, J.-S. Li. Physical Properties and Regulating Mechanism of Fluoride-Free and Harmless B_2O_3 -Containing Mould Flux // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007. **14**. P. 25–28.
17. Q. Li, Sh. Yang, Y. Zhang, Zh. An, Zh.Ch. Guo. Effects of MgO , Na_2O , and B_2O_3 on the viscosity and structure of Cr_2O_3 -bearing $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ slags // *ISIJ International*. 2017. **57**. № 4. P. 689–696.
18. Кель И.Н., Жучков В.И., Сычев А.В. Применение борсодержащих материалов в черной металлургии // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. **1421**. № 5. С. 48–54.
19. В.А. Ким, Э.И. Николай, А.А. Акбердин и др. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков // *Методическое пособие*. Алма-Ата: Наука. 1989. 116 с.
20. С.В. Штенгельмейер, В.А. Прусов, В.А. Богечов. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // *Заводская лаборатория*. 1985. № 9. С. 56–57.
21. В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев, А.Г. Михалевич, Т.И. Кухтин, С.В. Штенгельмейер. Свойства доменных шлаков: справочник. М.: Металлургия, 1975. 180 с.

**EFFECT OF BORON OXIDE AND BASICITY
ON VISCOSITY AND CRYSTALLIZATION ONSET TEMPERATURE
OF $CaO-SiO_2-B_2O_3-12\%Cr_2O_3-3\%Al_2O_3-8\%MgO$ SLAG SYSTEM**

A. A. Babenko, R. R. Shartdinov*, A. G. Upolovnikova, A. N. Smetannikov

Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

**E-mail: rr.shartdinov@gmail.com*

The rapid growth of demand for stainless steel and, accordingly, its production, which occurred in the second half of the 20th century and continues till today, makes it necessary to conduct studies of the properties of oxide systems that will contribute to the improvement of metallurgical production technologies for such steel. Therefore, in this paper, using the method of simplex grids for experimental planning and vibration viscometry, a study was conducted of the effect of basicity and boron oxide content on the viscosity and crystallization onset temperature of slags of the $CaO-SiO_2-B_2O_3-12\%Cr_2O_3-3\%Al_2O_3-8\%MgO$ oxide system formed during the reduction period of the production of low-carbon stainless steel by the argon-oxygen decarbonization (AOD)

process, which is currently the main method for producing corrosion-resistant steel. The introduction of boron oxide into AOD-slugs is a possible solution to the problem of instability of the physical properties of slags during smelting, caused by the volatility of fluorspar fluorides, traditionally used as a flux, and compliance with increasingly stringent environmental requirements by eliminating the formation of toxic fluorine compounds. Based on the results of experimental studies of the viscosity of slags of the studied oxide system depending on the chemical composition and temperature, approximating mathematical models in the form of a reduced third-degree polynomial are constructed. Graphically, the results of mathematical modeling are presented in the form of “composition – property” diagrams, which allow quantitatively determining the effect of temperature and chemical composition of the slags under study on viscosity and their composition on the crystallization onset temperature. It is noted that at 1600 and 1650°C, an increase in the boron oxide content in the slag from 3.0 to 6.0% has a favorable effect on the fluidity of the formed slags in the basicity range of 1.0–2.5. For example, an increase in the boron oxide concentration from 3.0 to 6.0% ensures a decrease in the viscosity of the slags from 2.0 to 0.5 Pa s at a temperature of 1600°C and from 0.4 to 0.3 Pa s at a temperature of 1650°C in the region of increased basicity up to 2.0–2.5.

Keywords: AOD-process, stainless steel, reduction period, slag, boron and chromium oxides, viscosity, crystallization onset temperature

REFERENCES

1. Stainless Steel in Figures 2020 // ISSF. URL: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2020_English_public_version.pdf (дата доступа: 2024-06-06).
2. Atlas shlakov [Slag atlas]: sprav. izd. Per. s nem. Moskva: Metallurgiya, 1985. 208 p. [In Russian]
3. F. Shahbazian, Du. Sichen, S. Seetharaman. The effect of addition of Al_2O_3 on the viscosity of CaO - FeO - SiO_2 - CaF_2 slags // ISIJ Internation. 2002. 42. № 2. P. 155–162.
4. J.H. Park, D.I. Min, H.S. Song. The effect of CaF_2 on the viscosities and structures of CaO - SiO_2 - (MgO) - CaF_2 slags // Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. 33. № 5. P. 723–739.
5. D.Ya. Povolockij, V.E. Roshchin, V.P. Gribanov, A.V. Rechkalova, A.A. Gajnullin. Vliyanie SiO_2 na letuchest' shlakov sistemy MgO - Al_2O_3 - CaF_2 [The influence of SiO_2 on the volatility of slags of the MgO - Al_2O_3 - CaF_2 system] // Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 1982. № 8. P. 39–41. [In Russian].
6. D.A. Dyudkin, V.V. Kisilenko. Vnepechnaya metallurgiya stali [Secondary metallurgy], Vol. 3. M.: Teplotekhnika, 2010. 544 p. [In Russian].
7. A.A. Akberdin, I.S. Kulikov, V.A. Kim, A.K. Nadyrbekov, A.S. Kim. Fizicheskie svoystva rasplavov sistemy CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - MgO - CaF_2 [Physical properties of melts of the CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - MgO - CaF_2 system]. M.: Metallurgiya, 1987. 144 p. [In Russian]
8. A.I. Zajcev, B.M. Mogutnov, E.H. Shahpazov. Fizicheskaya himiya metallurgicheskikh shlakov [Physical chemistry of metallurgical slags]. M.: Interkontakt Nauka, 2008. 352 p. [In Russian]
9. W. Hong-ming, L. Gui-rong, L. Bo, Z. Xue-jun, Y. Yong-qi. Effect of B_2O_3 on Melting temperature of CaO -Based Ladle Refining Slag // ISIJ International. 2010. 17. № 10. P. 18–22.
10. Babenko A.A., Istomin S.A., Protopopov E.V., Sychev A.V., Ryabov V.V. Viscosity of CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO - B_2O_3 slag system // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2014. 57. № 2. P. 41–43. [In Russian]

11. H.M. Wang, T.W. Zhang, H. Zhu, Y.Q. Yan, Y.N. Zhao. Effect of B_2O_3 and CaF_2 on viscosity of ladle refining slag // *Advanced Materials Research*. 2011. **295-297**. P. 2647–2650.
12. A.B. Fox, K.C. Mills, D. Lever, C. Bezerra, C. Valadares, I. Unamuno, J.J. Laraudogoitia, J. Gisby. Development of fluoride-free fluxes for billet casting // *ISIJ International* 2005. **45**. № 7. P. 1051–1058.
13. B.X. Lu, W.L. Wang, J. Li, H. Zhao, D.Y. Huang. Effects of Basicity and B_2O_3 on the Crystallization and Heat Transfer Behaviors of Low Fluorine Mold Flux for Casting Medium Carbon Steels // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. **44**. № 2. P. 365–377.
14. J. Wei, W.L. Wang, L.J. Zhou, D.Y. Huang, H. Zhao, F.J. Ma. Effect of Na_2O and B_2O_3 on the Crystallization Behavior of Low Fluorine Mold Fluxes for Casting Medium Carbon Steels // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. **45**. № 2. P. 643–652.
15. W. Wang, D. Cai, L. Zhang. A Review of Fluorine-free Mold Flux Development // *ISIJ International*. 2018. **58**. № 11. P. 1957–1964.
16. G.-R. Li, H.-M. Wang, Q.-X. Dai, Y.-T. Zhao, J.-S. Li. Physical Properties and Regulating Mechanism of Fluoride-Free and Harmless B_2O_3 -Containing Mould Flux // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007. **14**. P. 25–28.
17. Q. Li, Sh. Yang, Y. Zhang, Zh. An, Zh.Ch. Guo. Effects of MgO , Na_2O , and B_2O_3 on the viscosity and structure of Cr_2O_3 -bearing $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ slags // *ISIJ International*. 2017. **57**. № 4. P. 689–696.
18. Kel' I.N., Zhuchkov V.I., Sychev A.V. *Primenenie borsoderzhashchih materialov v chernoj metallurgii* [Application of boron-containing materials in ferrous metallurgy] // *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii*. 2018. **1421**. № 5. P. 48–54. [In Russian]
19. V.A. Kim, E.I. Nikolaj, A.A. Akberdin. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-himicheskikh svojstv metallurgicheskikh shlakov* [Planning an experiment in the study of the physicochemical properties of metallurgical slags] // *Metodicheskoe posobie*. Alma-Ata: Nauka. 1989. 116 p. [In Russian]
20. S.V. Shtengel'mejer, V.A. Prusov, V.A. Bogečov Shtengel'mejer, S.V. Uovershenstvovanie metodiki izmereniya vyazkosti vibracionnym viskozimetrom [Improvement of the technique of measuring viscosity using a vibration viscometer] // *Zavodskaya laboratoriya*. 1985. № 9. P. 56–57. [In Russian]
21. V.G. Voskobjnikov, N.E. Dunaev, A.G. Mihalevich, T.I. Kuhtin, S.V. Shtengel'mejer. *Svojstva domennyh shlakov* [Properties of blast furnace slags]: directory. M.: Metallurgiya, 1975. 180 p. [In Russian]