

УДК 669.046.584.2

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ЦЕРИЯ И ОСНОВНОСТИ ШЛАКОВ НА ИХ ВЯЗКОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

© 2023 г. А. Г. Уполовникова^а, Р. Р. Шартдинов^а, А. Н. Сметанников^а^аИнститут металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: upol.ru@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Исследование влияния содержания оксида церия и основности шлака на вязкость и температуру начала кристаллизации системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащей 15% Al_2O_3 и 8% MgO , было выполнено с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента, который позволяет получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции. 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 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащей 15% Al_2O_3 и 8% MgO , в интервале основности 2–5 и содержания 0–15% Ce_2O_3 . Экспериментальные данные показывают, что шлаки изучаемой оксидной системы, не содержащие оксид церия, характеризуются повышенной температурой начала кристаллизации и вязкостью в исследуемом диапазоне основности. Присутствие оксида церия в шлаках изучаемой оксидной системы обеспечивает в интервале температур 1500–1550°C достаточно низкую вязкость и температуру начала кристаллизации. Увеличение содержания оксида церия в шлаках основностью 2–3 от 1 до 15% сопровождается снижением температуры начала кристаллизации от 1490 до 1410°C. Повышение основности до 5.0 приводит к повышению температуры начала кристаллизации до 1520°C. При температуре 1500°C вязкость шлаков основностью 2.0–3.0, содержащих 7–15% Ce_2O_3 , изменяется в пределах 0.2–0.3 Па·с. Рост основности шлака до 3.0–5.0 при фиксированном содержании Ce_2O_3 на уровне 7–15% сопровождается увеличением вязкости шлаков до 1.0 Па·с и достигает 2.0 Па·с при снижении Ce_2O_3 до 1–6%. Увеличение температуры до 1550°C и фиксированной основности 3.0–5.0 сопровождается значительным снижением вязкости, которая не превышает 0.35 Па·с при содержании Ce_2O_3 1–15%.

Ключевые слова: церийсодержащие шлаки, основность, вязкость, температура начала кристаллизации, планирование эксперимента, диаграммы состав–вязкость

DOI: 10.31857/S0235010623060105, **EDN:** ZWFKDG

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность реализации глубокой десульфурации стали под высокоосновными шлаками определяется и высокой химической активностью компонентов шлака, а также обеспечением благоприятных кинетических условий перехода серы в объем шлака. Кинетические условия в первую очередь зависят от вязкости рафинировочных

шлаков, так как скорость диффузии компонентов в шлаке обратно пропорциональна его вязкости [1–3]. Поэтому снижение вязкости и температуры начала кристаллизации будут обеспечивать низкое содержание серы в металле, что влияет на качество готовой металлопродукции [4].

Для формирования жидкоподвижных шлаков с высокими рафинирующими свойствами можно использовать оксиды церия в ковшевой металлургии. Результаты исследования влияния добавок оксида церия на физические свойства оксидных систем показали, что оксид церия снижает вязкость и их температуру кристаллизации [5–7]. Кроме того, равновесие между рафинировочным шлаком, содержащим Ce_2O_3 , и расплавленной сталью, раскисленной Al, предполагает возможность восстановления небольшого количества Ce, который переходит в сталь [8–11], что играет важную роль в микролегировании и модифицировании стали. Однако в настоящее время в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют сведения о влиянии оксида церия и основности на физические свойства ковшевых шлаков. Целью данной работы было исследование вязкости и температуры кристаллизации шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. В работе приведены результаты исследования вязкости и температуры начала кристаллизации шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 15% Al_2O_3 и 8% MgO , с использованием метода симплексных решеток планирования эксперимента, который позволяет получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции.

МЕТОДИКА

Рассмотрена оксидная система $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащая 15% Al_2O_3 и 8% MgO . Для исследования влияния основности и содержания Ce_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 [12, 13]. При построении матрицы планирования эксперимента для системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-Ce}_2\text{O}_3$ на переменные составляющие оксидной системы были наложены ограничения: $\text{CaO/SiO}_2 = 2.0\text{--}5.0$; 15% Al_2O_3 ; 8% MgO ; 0–15% Ce_2O_3 . Область варьирования составом шлака в пятикомпонентной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$ представлена двумя концентрационными треугольниками $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, вершинами которого являются псевдокомпоненты Y_1 , Y_2 , Y_3 и Y_4 (рис. 1). В табл. 1 приводится состав шлаков симплекса, выраженный в координатах псевдокомпонентов и исходных компонентов.

Синтетические шлаки, соответствующие по составу вершинам $Y_1\text{--}Y_4$ изучаемого симплекса, выплавляли в графитовых тиглях из предварительно прокаленных в течение двух–трех часов при температуре 900°C оксидов марки “ч. д. а”. После расплавления шлак перемешивали в течение 0.5 ч с целью гомогенизации расплава. Экспериментальные составы шлаков, соответствующие остальным точкам плана локального симплекса, получали встречной шихтовкой шлаков вершин симплекса. Вязкость шлаков измеряли в графитовых тиглях с помощью электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояния [14, 15]. В качестве измерительного шпинделя применяли молибденовый стержень диаметром 1.5 мм. Температуру шлака фиксировали с помощью термопары ВР 5/20. Температуру начала кристаллизации шлаков исследуемой оксидной системы определяли графически по перегибу кривой зависимости логарифма вязкости от обратной температуры [16]. Результаты замера вязкости и температуры кристаллизации 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

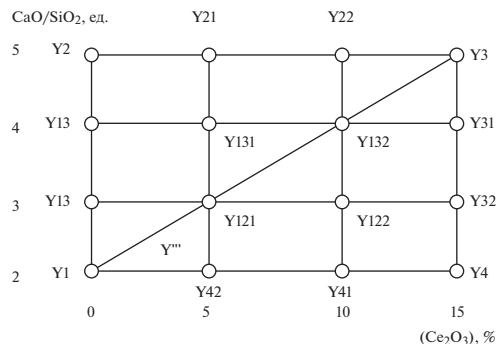


Рис. 1. Расположение экспериментальных точек на исследуемом локальном симплексе.

при уровне значимости $\alpha = 0.05$, описывающие зависимость температуры заданной вязкости от состава шлака. Ниже приведена математическая модель, в качестве примера, зависимости температуры от состава шлака при постоянной вязкости $0.3 \text{ Па} \cdot \text{с}$ для трехкомпонентной системы $Y_1 Y_2 Y_3$ (рис. 1):

$$T = 1530X_1 + 1600X_2 + 1512X_3 - 51.75X_1X_2 - \\ - 13.5X_1X_3 - 78.75X_2X_3 + 56.25X_1X_2 \cdot (X_1 - X_2) + \\ + 27X_1X_3 \cdot (X_1 - X_3) - 42.75X_2X_3 \cdot (X_2 - X_3) + 126X_1X_2X_3,$$

где X_1 , X_2 и X_3 – состав шлака, выраженный в дол. ед.

Таблица 1. Матрица планирования

№	Индекс шлака	Состав шлака								
		в координатах псевдокомпонентов, дол.				в координатах исходных компонентов, мас. %				
		X1	X2	X3	X4	CaO	SiO ₂	Ce ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
1	Y1	1	0	0	0	51.3	25.7	0	15	8
2	Y2	0	1	0	0	64.2	12.8	0	15	8
3	Y3	0	0	1	0	51.7	10.3	15	15	8
4	Y4	0	0	0	1	41.3	20.7	15	15	8
5	Y12	0.67	0.33	0	0	55.6	21.4	0	15	8
6	Y13	0.33	0.67	0	0	59.9	17.1	0	15	8
7	Y21	0	0.67	0.33	0	60.1	11.9	5	15	8
8	Y22	0	0.33	0.67	0	55.8	11.2	10	15	8
9	Y31	0	0	0.67	0.33	48.2	13.8	15	15	8
10	Y32	0	0	0.33	0.67	44.8	17.2	15	15	8
11	Y41	0.33	0	0	0.67	44.6	22.4	10	15	8
12	Y42	0.67	0	0	0.33	48	24	5	15	8
13	Y121	0.67	0	0.33	0	52	20	5	15	8
14	Y122	0.33	0	0.33	0.33	48.4	18.6	10	15	8
15	Y131	0.33	0.33	0.33	0	56	16	5	15	8
16	Y132	0.33	0	0.67	0	52.1	14.9	10	15	8

Таблица 2. Результаты замера вязкости

№	Индекс шлака	Состав шлака. мас. %					Температура, °С при вязкости, Па · с		Вязкость, Па · с. при T, °С		t _{кр} , °С
		CaO	SiO ₂	Ce ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	0.3	0.5	1500	1550	
1	Y1	51.3	25.7	0	15	8	1530	1492	0.40	0.26	1485
2	Y2	64.2	12.8	0	15	8	1600	1543	6.11	0.45	1532
3	Y3	51.7	10.3	15	15	8	1512	1494	0.41	0.23	1497
4	Y4	41.3	20.7	15	15	8	1440	1413	0.20	0.16	1397
5	Y12	55.6	21.4	0	15	8	1546	1516	0.70	0.30	1494
6	Y13	59.9	17.1	0	15	8	1561	1525	1.10	0.34	1503
7	Y21	60.1	11.9	5	15	8	1550	1516	1.80	0.30	1519
8	Y22	55.8	11.2	10	15	8	1527	1508	0.70	0.26	1510
9	Y31	48.2	13.8	15	15	8	1492	1471	0.26	0.18	1463
10	Y32	44.8	17.2	15	15	8	1465	1441	0.22	0.17	1419
11	Y41	44.6	22.4	10	15	8	1464	1432	0.24	0.20	1425
12	Y42	48	24	5	15	8	1508	1461	0.32	0.23	1448
13	Y121	52	20	5	15	8	1523	1488	0.39	0.25	1475
14	Y122	48.4	18.6	10	15	8	1493	1462	0.28	0.21	1445
15	Y131	56	16	5	15	8	1536	1505	0.60	0.27	1497
16	Y132	52.1	14.9	10	15	8	1513	1491	0.39	0.22	1485

Для трехкомпонентной системы Y₁ Y₄ Y₃:

$$T = 1530X_1 + 1440X_2 + 1512X_3 + 4.5X_1X_2 - \\ - 13.5X_1X_3 + 11.25X_2X_3 + 94.5X_1X_2 \cdot (X_1 - X_2) + \\ + 27X_1X_3 \cdot (X_1 - X_3) - 20.25X_2X_3 \cdot (X_2 - X_3) - 33.75X_1X_2X_3,$$

где X₁, X₄ и X₃ – состав шлака, выраженный в дол. ед.

Графическое изображение математических моделей в виде диаграмм состав–вязкость проводили в два этапа [17]. На первом этапе для каждого значения вязкости строили диаграммы, в которых изображались изотермы линий заданной постоянной вязкости. На рис. 2а приведен разрез диаграммы изотерм постоянной вязкости 0.3 Па · с шлака системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃, содержащего 15% Al₂O₃ и 8% MgO. На рис. 2б приведен разрез диаграммы изотерм постоянной вязкости 0.5 Па · с шлака системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃, содержащего 15% Al₂O₃ и 8% MgO. На втором этапе для двух значений температуры (1500 и 1550°С) строили диаграммы, в которых изображались зависимости вязкости от состава шлака. На рис. 3а приведен разрез диаграммы вязкости–состав шлака при температуре 1500°С и на рис. 3б при температуре 1550°С. Также для каждого образца шлака по матрице планирования (табл. 1) были получены математические модели в виде приведенного полинома III степени, адекватные при уровне значимости α = 0.05, описывающие зависимость температуры начала кристаллизации шлака от состава шлака (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные на диаграммах состав–свойство экспериментальные данные показывают, что шлаки изучаемой оксидной системы, не содержащие Ce₂O₃, характеризуют-

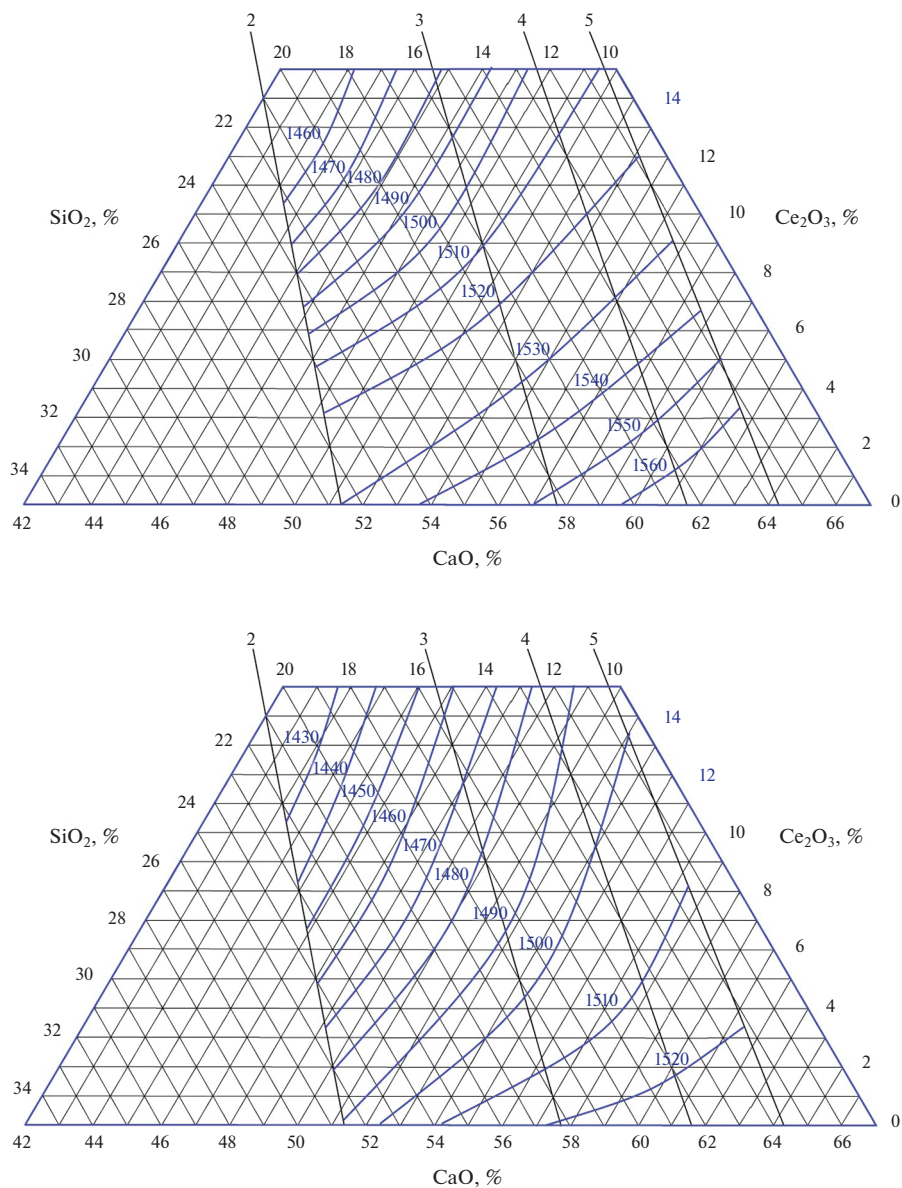


Рис. 2. Диаграмма температур заданной вязкости шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 8% MgO и 15% Al_2O_3 ; $a - 0.3$; $b - 0.5 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (синие линии – температура, $^{\circ}\text{C}$; черные линии – линии основности).

ся повышенной температурой начала кристаллизации и вязкостью. Температура начала кристаллизации изменяется от 1485°C при основности 2.0 до 1520°C при основности 5.0 (рис. 4). При этом вязкость шлаков в рассматриваемом диапазоне основности изменяется от 0.4 до 2.0 $\text{Па} \cdot \text{с}$ при температуре 1500°C (рис. 3а) и от 0.27 до 0.35 $\text{Па} \cdot \text{с}$ при температуре 1550°C (рис. 3б).

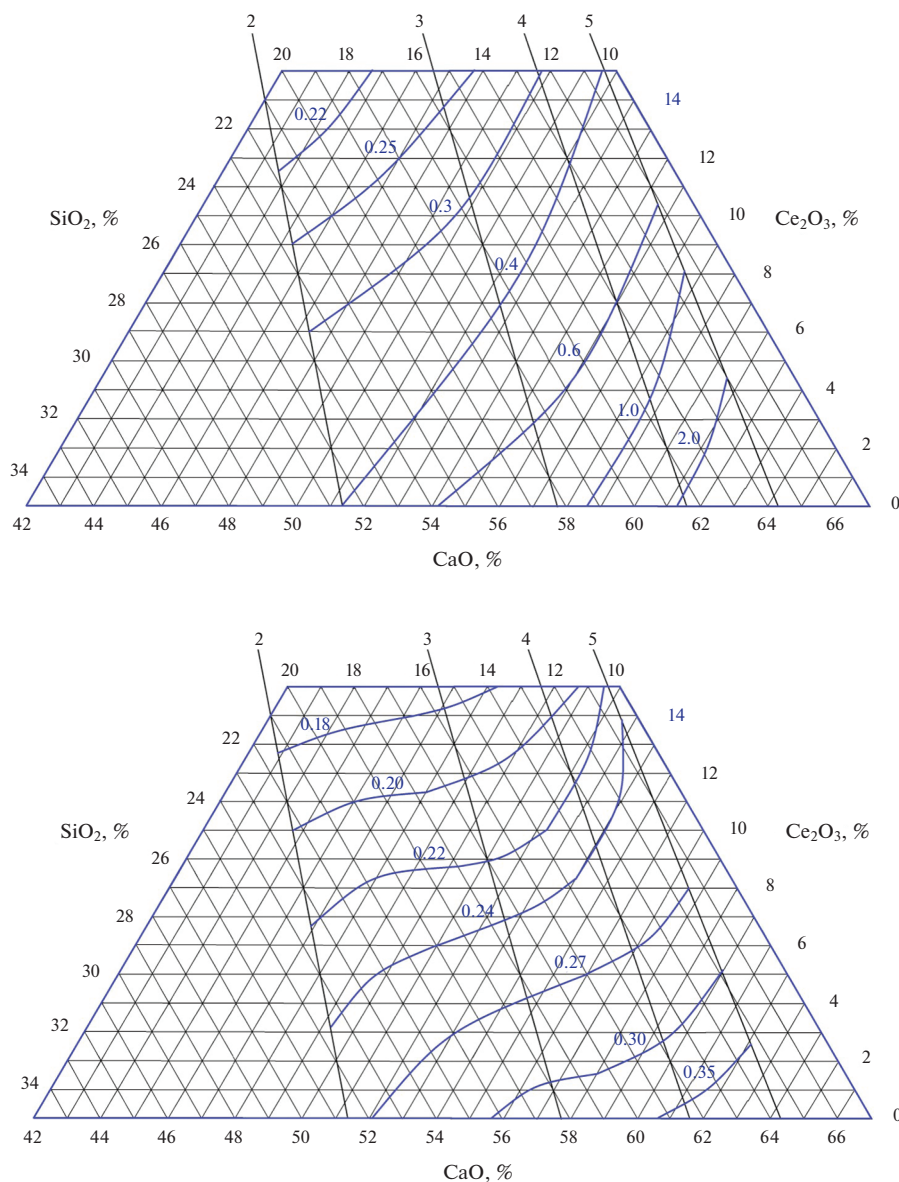


Рис. 3. Диаграмма вязкостей шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 8% MgO и 15% Al_2O_3 : а – при температуре 1500; б – при температуре 1550°C (синие линии – вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; черные линии – линии основности).

Присутствие Ce_2O_3 в шлаках изучаемой оксидной системы расширяет диапазон состава шлаков с низкой температурой начала кристаллизации и вязкостью. Увеличение содержания Ce_2O_3 в шлаках основностью 2.0–3.0 от 1 до 15% сопровождается снижением температуры начала кристаллизации от 1490 до 1410°C с сохранением низкой вязкости не более 0.6 и 0.27 $\text{Па} \cdot \text{с}$ в диапазоне температур нагрева системы 1500 и 1550°C соответственно.

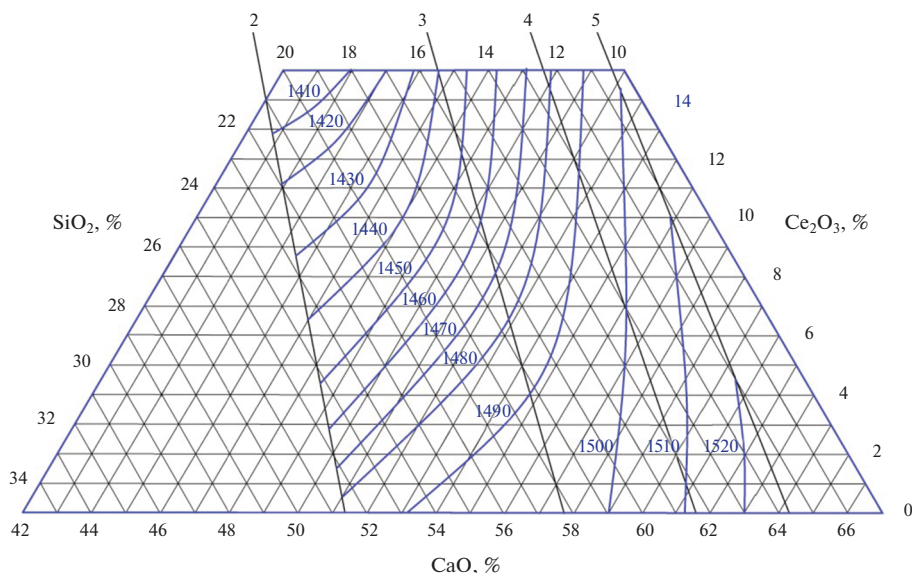


Рис. 4. Диаграмма температур кристаллизации шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 8% MgO и 15% Al_2O_3 (синие линии – вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; черные линии – линии основности).

Присутствие Ce_2O_3 в шлаках изучаемой оксидной системы обеспечивает в интервале температур 1500–1550°С достаточно низкую вязкость. При температуре 1500°С вязкость шлаков основностью 2.0–3.0, содержащих 7–15% Ce_2O_3 , изменяется в пределах 0.2–0.3 $\text{Па} \cdot \text{с}$. Рост основности шлака до 3.0–5.0 при фиксированном содержании Ce_2O_3 на уровне 7–15% сопровождается увеличением вязкости шлаков до 1.0 $\text{Па} \cdot \text{с}$ и достигает 2.0 $\text{Па} \cdot \text{с}$ при снижении Ce_2O_3 до 1–6% (рис. 4).

Увеличение температуры до 1550°С и фиксированной основности 3.0–5.0 сопровождается значительным снижением вязкости, которая не превышает 0.35 $\text{Па} \cdot \text{с}$ при содержании Ce_2O_3 1–15% (рис. 5).

Таким образом, экспериментальные исследования физических свойств основных церийсодержащих шлаков с использованием метода симплексных решеток планирования позволили с минимальными материальными и временными затратами получить новые данные, характеризующие влияние химического состава шлаков на вязкость и температуру кристаллизации, которые имеют практическую значимость. При температурах 1500–1550°С шлаки основностью 2.0–5.0 ед., содержащие 1–15% Ce_2O_3 , будут сохранять высокую жидкоподвижность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальные исследования в совокупности с математическим методом симплексных решеток планирования позволили с минимальными (16 опытов) затратами получить новые данные о вязкости шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$, содержащей 15% Al_2O_3 и 8% MgO в широком диапазоне химического состава и температур.

2. На диаграммах состав–вязкость шлаки основностью 2.0–5.0, содержащие 1–15% Ce_2O_3 , 15% Al_2O_3 и 8% MgO характеризуются при температуре 1550°С высокой жидкоподвижностью с вязкостью, изменяющейся от 0.18 до 0.35 $\text{Па} \cdot \text{с}$. При этом снижение

температуры до 1500°C высокая жидкоподвижность шлаков сохраняется в диапазоне основности 2.0–4.0 при концентрации 7–15% Ce_2O_3 .

3. Шлаки основностью 2.0–5.0, содержащие 1–15% Ce_2O_3 , характеризуется достаточно низкой температурой начала кристаллизации, изменяющейся от 1410 до 1520°C.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00975, <https://rscf.ru/project/22-29-00975/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель С.И. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1986.
2. Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. М.: Металлургия, 1977.
3. Истомин С.А., Бахвалов С.Г., Денисов В.М., Пастухов Е.А., Овчинников Т.Ю. Вязкость и электропроводность расплавов систем $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3$ // Расплавы. 1995. № 5. С. 36–43.
4. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО “Северсталь” с учетом технологических аспектов // Тр. VI конгресса сталеплавильщиков. М.: АО “Черметинформация”. 2001. С. 63–66.
5. Wu C., Cheng G., Long H. // High Temperature Materials and Processes. 2014. 33. № 1. P. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
6. Zheng X., Liu Ch., Qi J., Sun J., Zhang X. // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. 8. P. 1104–1116. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00544-6>
7. Zheng X., Liu Ch. // ISIJ International. 2022. 62. № 6. P. 1091–1098. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-545>
8. Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. // Journal of rare earths. 2011. 29. № 11. P. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
9. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Shartdinov R.R. Study of possibility of cerium reduction from slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3-15\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO}$ system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. “15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy”. 2020. P. 012010.
10. Wu Ch., Cheng G., Long H., Yang X.A // High Temp. Mater. Proc. 2013. 32. № 3. P. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
11. Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Прямое микролегирование стали церием под шлаками системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3-15\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO}$ дополнительными восстановителями // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2021. 64. № 8. С. 581–587.
12. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав-вязкость // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167.
13. Ким В.А., Николай Э.И., Акбердин А.А., Куликов И.С. Планирование эксперимента при исследовании физико – химических свойств металлургических шлаков: Методическое пособие. Алма-Ата: Наука, 1989.
14. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Богечов В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // Заводская лаборатория. 1985. № 9. С. 56–57.
15. Истомин С.А., Хохряков А.А., Рябов В.В., Иванов А.В., Пайвин А.С. Влияние механо-активированных оксидов РЗЭ лантанидной группы на вязкость боратных расплавов // Расплавы. 2014. № 5. С. 69–77.
16. Воскобойников В.Г. и др. Свойства доменных шлаков: справочник. М.: Металлургия, 1975.
17. Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н., Лобанов Д.А., Уполовникова А.Г. Построение диаграмм вязкости шлаков, содержащих оксиды хрома и бора, методом симплексных решеток // Металлы. 2023. № 3. С. 61–65.

EFFECT OF CERIUM OXIDE AND BASICITY OF SLAGS ON THEIR VISCOSITY AND CRYSTALLIZATION START TEMPERATURE

A. G. Upolovnikova¹, R. R. Shartdinov¹, A. N. Smetannikov¹

¹*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

The study of the influence of the content of cerium oxide and the basicity of the slag on the viscosity and temperature of the onset of crystallization of the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$ system

containing 15% Al_2O_3 and 8% MgO was carried out using the simplex-lattice method of experiment planning, which makes it possible to obtain mathematical models describing the dependence of the property on the composition as a continuous function. Using the experimental data, we built mathematical models that describe the relationship between the temperature of a given viscosity and the composition of the oxide system. Then, by combining the obtained composition-temperature diagrams of a given viscosity on the isothermal section of the composition-viscosity diagram, a set of viscosity isolines was obtained. Generalization of the results of mathematical modeling and graphical display on the isothermal section of the composition-viscosity diagram made it possible to obtain new data on the viscosity of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ oxide system containing 15% Al_2O_3 and 8% MgO , in the range of basicity 2–5 and the content of 0–15% Ce_2O_3 . Experimental data show that the slags of the studied oxide system, which do not contain cerium oxide, are characterized by an increased crystallization temperature and viscosity in the studied range of basicity. The presence of cerium oxide in the slags of the studied oxide system provides a rather low viscosity and crystallization start temperature in the temperature range of 1500–1550°C. An increase in the content of cerium oxide in slags with a basicity of 2–3 from 1 to 15% is accompanied by a decrease in the crystallization onset temperature from 1490 to 1410°C. Increasing the basicity to 5.0 leads to an increase in the temperature of the onset of crystallization to 1520°C. At a temperature of 1500°C, the viscosity of slags with a basicity of 2.0–3.0, containing 7–15% Ce_2O_3 , varies within 0.2–0.3 Pa · s. An increase in slag basicity to 3.0–5.0 at a fixed Ce_2O_3 content of 7–15% is accompanied by an increase in slag viscosity up to 1.0 Pa · s and reaches 2.0 Pa · s with a decrease in Ce_2O_3 to 1–6%. An increase in temperature to 1550°C and a fixed basicity of 3–5 is accompanied by a significant decrease in viscosity, which does not exceed 0.35 Pa · s at a Ce_2O_3 content of 1–15%.

Keywords: cerium-containing slags, basicity, viscosity, crystallization onset temperature, experiment planning, composition-property diagrams

REFERENCES

1. Popel' S.I. *Teoriya metallurgicheskikh processov* [Theory of metallurgical processes]. M.: Metallurgiya, 1986. [In Russian].
2. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinirovanie stali* [Out-of-furnace steel refining]. M.: Metallurgiya, 1977. [In Russian].
3. Istomin S.A., Bahvalov S.G., Denisov V.M., Pastukhov E.A., Ovchinnikov T.Y. *Vyazkost' i elektroprovodnost' rasplavov sistem $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ i $\text{ZnO-B}_2\text{O}_3$* [Viscosity and electrical conductivity of melts of the $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ and $\text{ZnO-B}_2\text{O}_3$ systems] // *Raspavy*. 1995. № 5. P. 36–43. [In Russian].
4. Chumakov S.M., Lamuhin A.M., Zinchenko S.D. *Koncepciya proizvodstva nizkosernistyyh stalej na OAO "Severstal" s uchetom tekhnologicheskikh aspektov* [The concept of low-sulfur steel production at OAO "Severstal", taking into account technological aspects] // *Trudy VI kongressa staleplavil'shchikov*. M.: AO "Chermetinformaciya". 2001. P. 63–66. [In Russian].
5. Wu C., Cheng G., Long H. // *High Temperature Materials and Processes*. 2014. **33**. № 1. P. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
6. Zheng X., Liu Ch., Qi J., Sun J., Zhang X. // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022. **8**. P. 1104–1116. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00544-6>
7. Zheng X., Liu Ch. // *ISIJ International*. 2022. **62**. № 6. P. 1091–1098. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-545>
8. Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. // *Journal of rare earths*. 2011. **29**. № 11. P. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
9. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Shartdinov R.R. *Study of possibility of cerium reduction from slags of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15%Al}_2\text{O}_3\text{-8%MgO}$ system* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy". 2020. P. 012010.
10. Wu Ch., Cheng G., Long H., Yang X.A. // *High Temp. Mater. Proc.* 2013. **32**. № 3. P. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
11. Upolovnikova A.G., Babenko A.A., Smirnov L.A., Mihajlova L.Yu. *Pryamoe mikrolegirovanie stali ceriem pod shlakami sistemy $\text{SaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15%Al}_2\text{O}_3\text{-8%MgO}$ dopolnitel'nymi vosstanovitel'yami* [Direct microalloying of steel with cerium under slags of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15%Al}_2\text{O}_3\text{-8%MgO}$ system with additional reducing agents] // *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*. 2021. **64**. № 8. P. 581–587. [In Russian].

12. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. Ispol'zovanie metoda simpleksnyh reshetok dlya postroeniya diagramm tipa sostav–vyazkost' [Using the method of simplex lattices for constructing composition-viscosity diagrams] // Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. 1980. № 9. P. 167. [In Russian].
13. Kim V.A., Nikolaj E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-himicheskikh svoystv metallurgicheskikh shlakov: Metodicheskoe posobie [Planning an experiment in the study of the physico-chemical properties of metallurgical slags: Methodological guide]. Alma-Ata: Nauka. 1989. [In Russian].
14. Shtengel'mejer S.V., Prusov V.A., Bogechev V.A. Uovershenstvovanie metodiki izmereniya vyazkosti vibracionnym viskozimetrom [Improving the method for measuring viscosity with a vibrating viscometer] // Zavodskaya laboratoriya. 1985. № 9. P. 56–57. [In Russian].
15. Istomin S.A., Hohryakov A.A., Ryabov V.V., Ivanov A.V., Pajvin A.S. Vliyanie mekhano-aktivirovannyh oksidov RZE lantanidnoj gruppy na vyazkost' boratnyh rasplavov [Influence of mechanically activated oxides of REE of the lanthanide group on the viscosity of borate melts] // Rasplavy. 2014. № 5. P. 69–77. [In Russian].
16. Voskobojnikov V.G. Svoystva domennyh shlakov: spravochnik [Properties of blast-furnace slags: a reference book]. M.: Metallurgiya. 1975. [In Russian].
17. Babenko A.A., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N., Lobanov D.A., Upolovnikova A.G. Postroenie diagramm vyazkosti shlakov, sodержashchih oksidy hroma i bora, metodom simpleksnyh reshetok [Construction of viscosity diagrams for slags containing chromium and boron oxides using the simplex lattice method] // Metally. 2023. № 3. P. 61–65. [In Russian].