



УДК 669.046.584.2

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-205-210



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОСТИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОВШЕВЫХ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$

А. Г. Уполовникова[✉], Р. Р. Шартдинов, А. Н. Сметанников

Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Свердловская обл., Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

upol.ru@mail.ru

Аннотация. Исследованы физические свойства шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$, содержащих оксид церия. В основе разработанных шлаков кальций-силикатная система, основность $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ которой оказывает большое влияние на свойства шлака. Обобщение результатов выполненных исследований позволило получить новые данные о влиянии основности в церийсодержащих шлаках изучаемой оксидной системы на вязкость, температуру начала кристаллизации и структуру. Экспериментальные исследования физических свойств этих шлаков показали, что с ростом основности от 2,0 до 5,0 наблюдается рост температуры начала кристаллизации и вязкости, что связано со структурой формируемых шлаков. Повышение основности способствует повышению вязкости от 0,20 до 0,41 Па·с при температуре 1500 °С и повышению температуры кристаллизации от 1397 до 1497 °С. Полученные результаты показали, что на структуру церийсодержащего шлака влияют как ион Si^{4+} , так и ион Al^{3+} , которые являются сеткообразователями. Ионы кремния в рассматриваемой системе присутствуют в виде $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдров, тогда как ионы алюминия присутствуют в виде $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров и $[\text{AlO}_6]$ -октаэдров. С повышением основности от 2,0 до 2,5 кремниевая структура усложняется, а затем при основности 3,5 – 5,0 упрощается. Алуминатная структура усложняется за счет повышения содержания оксида CaO, который участвует в компенсации заряда полимеризованных структурных единиц $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров с образованием более стабильной тетраэдрической структуры, и, как следствие, повышенной вязкости шлака. Шлаки изучаемой оксидной системы, содержащие 15 % Ce_2O_3 , характеризуются в рассматриваемом диапазоне основности достаточно высокой жидкоподвижностью.

Ключевые слова: вязкость, температура начала кристаллизации, рамановская спектроскопия, оксид церия, шлак, фазовый состав, структура шлака

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

Для цитирования: Уполовникова А.Г., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н. Влияние основности на физические свойства ковшевых шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(2):205–210. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-205-210>

EFFECT OF BASICITY ON PHYSICAL PROPERTIES OF LADLE SLAGS OF $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ SYSTEM

A. G. Upolovnikova[✉], R. R. Shartdinov, A. N. Smetannikov

Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

upol.ru@mail.ru

Abstract. The authors studied the physical properties of the slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ system containing cerium oxide. The developed slags are based on a calcium silicate system, the basicity $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ of which has a great influence on the slag properties. Generalization of the performed studies results allowed obtaining new data on the effect of basicity in cerium-containing slags of the studied oxide system on viscosity, temperature of crystallization onset and structure. Experimental studies of the physical properties of cerium-containing slags showed that with an increase in basicity of 2.0 – 5.0, an increase in temperature of crystallization onset and viscosity is observed associated with structure of the formed slags. An increase in basicity from 2.0 to 5.0 contributes to an increase in viscosity from 0.20 to 0.41 Pa·s at 1500 °C and an increase in the crystallization temperature from 1397 to 1497 °C. The structural analysis showed that the structure of the cerium-containing slag is influenced by both the Si^{4+} ion and the Al^{3+} ion, which are grid-forming agents. Silicon ions in this system are present in the form of $[\text{SiO}_4]$ -tetrahedra, whereas aluminum ions are

present in form of $[\text{AlO}_4]$ -tetrahedra and $[\text{AlO}_6]$ -octahedra. With an increase in basicity 2.0 to 2.5, the silicon structure becomes more complicated, and then at a basicity of 3.5 – 5.0 it becomes simpler, whereas the aluminate one becomes more complicated due to an increase in the content of CaO , which participates in charge compensation of polymerized structural units $[\text{AlO}_4]$ -tetrahedra with the formation of a more stable tetrahedral structure, and as a result of increased slag viscosity. Slags of the studied oxide system containing 15 % Ce_2O_3 are characterized by a sufficiently high liquid mobility in the considered basicity range.

Keywords: viscosity, crystallization temperature, Raman spectroscopy, cerium oxide, slag, phase composition, slag structure

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00975, <https://rscf.ru/project/22-29-00975/>.

For citation: Upolovnikova A.G., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N. Effect of basicity on physical properties of ladle slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):205–210. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-205-210>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее значимых физических свойств шлаков является вязкость, поскольку в основе металлургических процессов лежат явления, зависящие от характера тепло- и массопереноса в шлаке и металле [1; 2]. Перспективным направлением снижения вязкости рафинировочных шлаков является использование оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ). Результаты исследования влияния добавок оксида церия на физические свойства шлаков показали, что оксид церия снижает вязкость и температуру кристаллизации шлака [3 – 5]. Так же в последние годы сообщалось, что добавление в шлак оксидов РЗЭ может понизить активность оксида Al_2O_3 в шлаке и повысить адсорбционную способность шлака к включениям Al_2O_3 в металле [6 – 8]. Кроме того, равновесие между рафинировочным шлаком, содержащим Ce_2O_3 , и расплавленной сталью, раскисленной алюминием, предполагает возможность восстановления небольшого количества церия, который переходит в сталь [9 – 11], обеспечивая ее микролегирование и модифицирование [12]. Однако в настоящее время в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют сведения о влиянии основности на физические свойства церийсодержащих ковшевых шлаков.

Целью настоящей работы было исследование физических свойств шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$. Обобщение результатов выполненных исследований позволило получить новые данные о влиянии основности церийсодержащих шлаков изучаемой оксидной системы на вязкость, температуру начала кристаллизации и структуру.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шлаки оксидной системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ выплавляли в печи сопротивления в графитовых тиглях в атмосфере аргона из прокаленных в течение 2 – 3 ч при температуре 800 °С оксидов марки ч.д.а. Вязкость шлаков измеряли в графитовых тиглях при помощи электровибрационного вискозиметра в токе аргона при непрерывном охлаждении расплава от гомогенно-жидкого до твердого состояний [13]. В качестве измерительного шпинделя применяли молибденовый стержень диаметром 1,5 мм. Температуру шлака фиксировали с помощью вольфрам-рениевой термопары ВР 5/20. Температуру кристаллизации шлаков определяли согласно теории вязкого течения Френкеля; для этого строили графики в координатах $\ln \eta - 1/T$, перелом на которых соответствует температуре начала кристаллизации шлаков [14]. Результаты замера вязкости и температуры кристаллизации шлаков представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Исследование структуры опытных образцов шлака выполнено с использованием рамановского микроскопа-спектрометра U 1000 с использованием лазера с возбуждающей длиной волны 532 нм. Полученные спектры представлены на рис. 2 в диапазоне волновых чисел 450 – 1250 см^{-1} . Наблюдаемые линии такого спектра могут быть однозначно отнесены к колебаниям молекул исследуемого вещества и в зависимости от значения частоты, интенсивности и формы линий позволяют сделать вывод о структуре шлака [15]. На рис. 2 представлены рамановские спектры образцов шлаков с различной основностью, на которых наблюдаются пики: в низкочастотной области волно-

Таблица 1. Состав, температура начала кристаллизации и вязкость экспериментальных шлаков

Table 1. Composition, temperature of crystallization onset and viscosity of experimental slags

Содержание оксида, %					B	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	Вязкость, Па·с, при $T, ^\circ\text{C}$	
CaO	SiO_2	Ce_2O_3	MgO	Al_2O_3			1500	1550
41,3	20,7	15	8	15	2,0	1397	0,20	0,16
44,8	17,2	15	8	15	2,5	1419	0,22	0,17
48,2	13,8	15	8	15	3,5	1463	0,26	0,18
51,7	10,3	15	8	15	5,0	1497	0,41	0,23

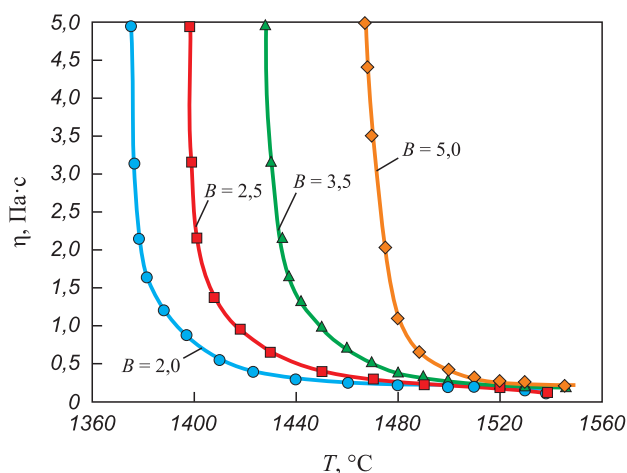


Рис. 1. Зависимость вязкости шлаков от температуры при основности 2,0 (●), 2,5 (■), 3,5 (▲) и 5,0 (◆)

Fig. 1. Dependence of viscosity of the slags on temperature at basicity of 2.0 (●), 2.5 (■), 3.5 (▲) and 5.0 (◆)

вых чисел около 600 см^{-1} , представляющие валентные колебания Al – O в $[\text{AlO}_6]$ -октаэдрах в диапазоне основности шлака 2,0 – 2,5; с повышением основности до 3,5 – 5,0 единиц появляются пики в области около 550 см^{-1} , связанные с поперечным движением мостикового кислорода внутри связи Al – O – Al; пики в области $650 – 800\text{ см}^{-1}$, отражающие валентные колебания Al – O в $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдрах. Пики в области высоких волновых чисел ($800 – 950\text{ см}^{-1}$) относятся к силикатной структуре ($[\text{SiO}_4]$ -тетраэдрам). Интенсивность и форма этих пиков позволяют оценить влияние основности на структуру формируемых шлаков и их вязкость.

Для дальнейшего количественного определения изменения структурных единиц при различной основности в шлаке рамановские спектры (рис. 2) подвергали деконволюции методом Гаусса с помощью программы PeakFit с коэффициентом корреляции не менее 0,99. Результаты деконволюции спектров комбинационного рассеяния силикатной области показаны на рис. 3 и в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурная зависимость вязкости изучаемых шлаков в диапазоне основности 2,0 – 5,0 приведена на рис. 1. С ростом основности шлаки из жидкоподвижных с низкой температурой кристаллизации плавно переходят в шлаки с высокими вязкостью и температурой начала кристаллизации (табл. 1), что можно объяснить особенностями структуры шлака.

Формируемая структура шлака основностью 2,0 является малополимеризованной, поскольку характеризуется, как отмечено выше, наличием $[\text{AlO}_6]$ -октаэдров, которые играют роль модификатора сетки (рис. 2), и двух деполи-

Таблица 2. Доли структурных элементов

Table 2. Proportion of structural elements

Шлак	<i>B</i>	Q_{Si}^0	Q_{Si}^1	ВО
1	2,0	0,48	0,52	0,52
2	2,5	0,41	0,59	0,59
3	3,5	0,53	0,47	0,47
4	5,0	0,88	0,12	0,12

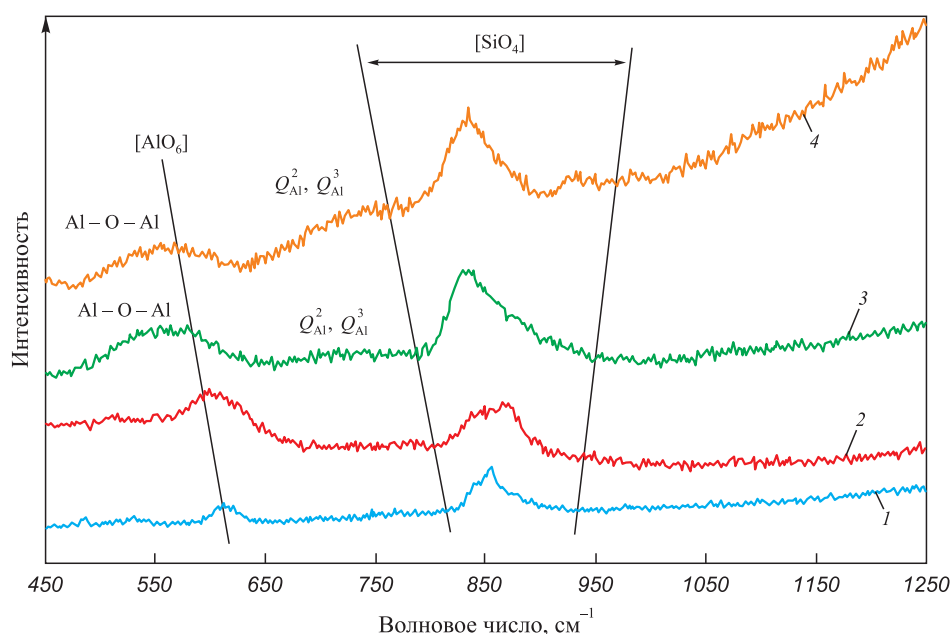


Рис. 2. Рамановские спектры изучаемых шлаков при основности 2,0 (1), 2,5 (2), 3,5 (3) и 5,0 (4)

Fig. 2. Raman spectra of the slags at basicity of 2.0 (1), 2.5 (2), 3.5 (3) and 5.0 (4)

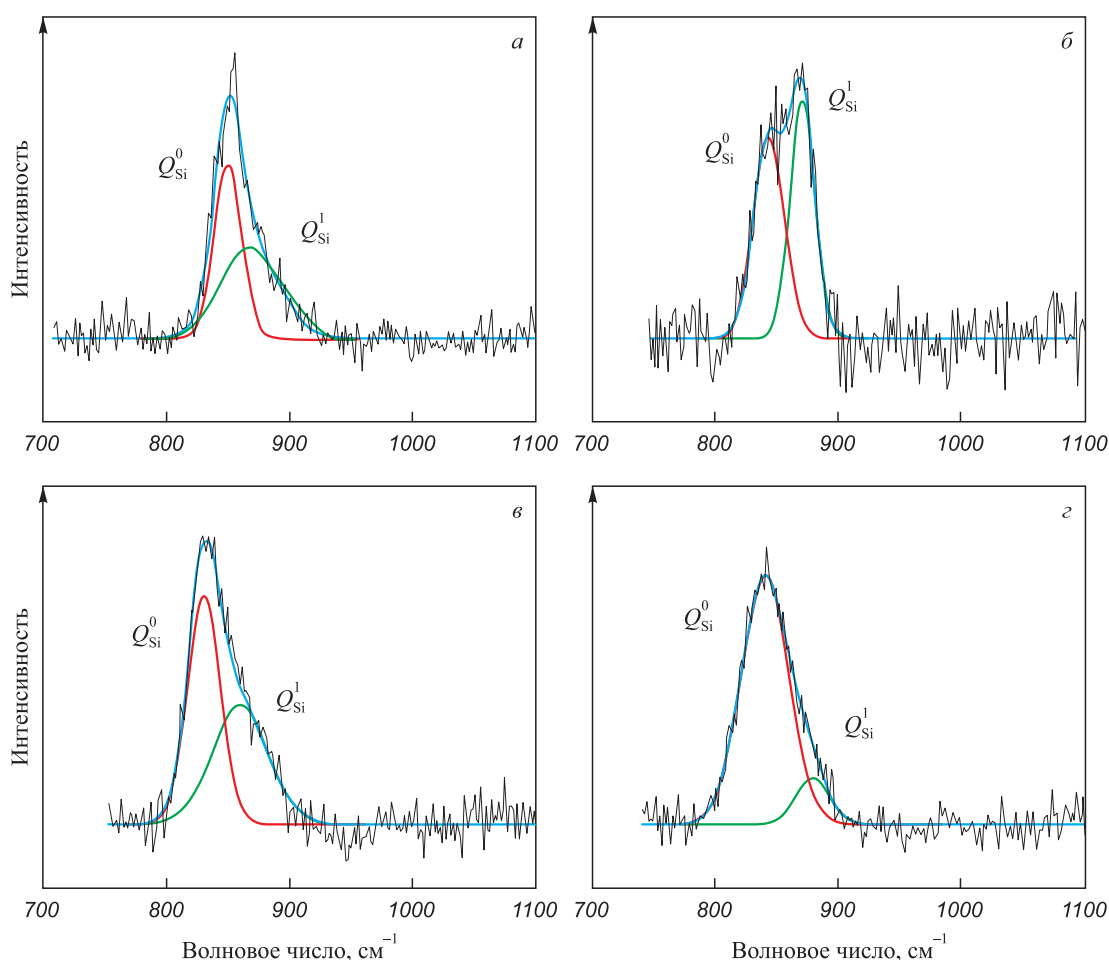


Рис. 3. Деконволюция силикатной области при основности 2,0 (а), 2,5 (б), 3,5 (в) и 5,0 (г)

Fig. 3. Deconvolution of the silicate region at basicity of 2.0 (a), 2.5 (б), 3.5 (в) and 5.0 (г)

меризованных структурных единиц кремния: $[\text{SiO}_4]^{4-}$ с повышенной до 0,48 долей немостикового кислорода (Q_{Si}^0) и $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$ с повышенной до 0,52 долей с одним мостиковым кислородом (Q_{Si}^1) (рис. 3, табл. 2). Такая структура возникает вследствие присутствия оксидов кальция и церия в шлаке, которые являются модификаторами структуры. При их диссоциации в расплавах высвобождаются больше ионов O^{2-} , которые взаимодействуют с $[\text{AlO}_4]^-$ и $[\text{SiO}_4]^-$ тетраэдрами, разрушая алюминатную и силикатную структуры расплава [16; 17]. Поэтому данные шлаки обладают низкой температурой кристаллизации (1397 °C) и низкой вязкостью (0,20 и 0,16 Па·с) при температурах 1500 и 1550 °C (табл. 1).

При увеличении основности до 2,5 наблюдается усложнение силикатной структуры. Степень ее полимеризации растет с 0,52 до 0,59, доля немостикового кислорода снижается от 0,48 до 0,41, а доля с одним мостиковым кислородом повышается от 0,52 до 0,59 (табл. 2). В шлаках с высокой основностью, содержащих Al_2O_3 , ионы Al^{3+} поглощаются силикатной структурой, действуя как элементы-сеткообразователи, увеличивая сложность силикатной структуры [18]. Усложнение структуры шлака приводит к повышению температуры

начала кристаллизации до 1419 °C и вязкости до 0,22 и 0,17 Па·с при температурах 1500 и 1550 °C (табл. 1).

При повышении основности до 3,5 и 5,0 наблюдается появление пика в области около 550 cm^{-1} , что связано с поперечным движением мостикового кислорода внутри связи $\text{Al} - \text{O} - \text{Al}$. Относительная интенсивность $\text{Al} - \text{O} - \text{Al}$ постепенно повышается с увеличением основности, тогда как для $[\text{AlO}_6]^-$ -октаэдров наблюдается обратная тенденция. Это указывает на усиление связи $\text{Al} - \text{O} - \text{Al}$ и уменьшение доли $[\text{AlO}_6]^-$ -октаэдров, что приводит к полимеризации алюминатной сетки. Кроме того, с ростом основности шлака с 3,5 до 5,0 наблюдается увеличение интенсивности пика в области волновых чисел 650 – 800 cm^{-1} , что связано с симметричными валентными колебаниями $[\text{AlO}_3]^{3-}$ (Q_{Al}^2) и $[\text{Al}_2\text{O}_3]^{4-}$ (Q_{Al}^3) [16; 17], которые также свидетельствуют об усложнении алюминатной структуры в расплаве шлака (рис. 2), вследствие чего увеличивается температура начала кристаллизации до 1463 и 1497 °C. Вязкость увеличивается до 0,26 и 0,18 Па·с при температурах 1500 и 1550 °C при основности 3,50 и до 0,41 и 0,23 Па·с при температурах 1500 и 1550 °C при основности 5,0.

На фоне полимеризации алюминатной структуры при основности 3,5 и 5,0 наблюдается упрощение силикатной структуры и степень полимеризации снижается с 0,47 до 0,12 (табл. 2). Оксид CaO может действовать не только как модификатор сетки, но и как компенсатор заряда за счет избытка ионов Ca^{2+} , образующихся с ростом основности. Катионы Ca^{2+} будут компенсировать полимеризованные структурные единицы $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров с образованием более стабильной тетраэдрической структуры, что и приводит к увеличению вязкости шлака [19; 20]. Ионы церия могут быть компенсаторами заряда и стабилизировать алюминатную структуру [3; 21; 22].

Выводы

Экспериментальные исследования физических свойств шлаков оксидной системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ показали, что с ростом основности от 2,0 до 5,0 наблюдается рост температуры начала кристаллизации и вязкости, что связано со структурой формируемых шлаков. С ростом основности наблюдается усложнение алюминатной структуры и упрощение силикатной структуры за счет избытка ионов Ca^{2+} , действующих как компенсатор заряда полимеризованных структурных единиц $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров. В целом шлаки изучаемой оксидной системы, содержащие 15 % Ce_2O_3 , характеризуются в рассматриваемом диапазоне основности достаточно высокой жидкоподвижностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Попель С.И. Теория металлургических процессов. Москва: Металлургия; 1986:463.
- Соколов Г.А. Внепечное рафинирование стали. Москва: Металлургия; 1977:208.
- Wu C., Cheng G., Long H. Effect of Ce_2O_3 and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the phase, melting temperature and viscosity of $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 10 \text{ mass } \% \text{SiO}_2$ based slags. *High Temperature Materials and Processes*. 2014;33(1):77–84. <http://dx.doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
- Liu C., Qi J., Sun J., Zhang X. Design and fluidity research of a new tundish flux for rare earth steel. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8:1104–1116. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00544-6>
- Zheng X., Liu C. Effect of Ce_2O_3 on the melt structure and properties of $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ -based slag. *ISIJ International*. 2022;62(6):1091–1098. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-545>
- Wang L.J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of Al_2O_3 in refining slags containing Ce_2O_3 . *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2016;52(1):35–40. <https://doi.org/10.2298/JMMB140706004W>
- Liu Y.Q., Wang L.J., Chou K.C. Dissolution behavior of Al_2O_3 in refining slags containing Ce_2O_3 . *ISIJ International*. 2014;54(4):728–733. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.54.728>
- Cao J., Li Y., Lin W., Che J., Zhou F., Tan Y., Li D., Chen C., Dang J. Assessment of inclusion removal ability in refining slags containing Ce_2O_3 . *Crystals*. 2023;13(2):202. <https://doi.org/10.3390/cryst13020202>
- Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing Ce_2O_3 on steel cleanliness. *Journal of Rare Earths*. 2011;29(11):1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
- 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. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;966:012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012010>
- 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):581–587. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>
- Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Direct microalloying of steel with cerium under slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15 \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8 \% \text{MgO}$ system with additional reducing agents. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):581–587. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>
- Кудрин В.А. Внепечная обработка чугуна и стали. Москва: Металлургия; 1992:336.
- Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Богачев В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром. *Заводская лаборатория*. 1985;51(9):56–57.
- Shtengel'meier S.V., Prusov V.A., Bogachev V.A. Improvement of the viscosity measurement technique with a vibrating viscometer. *Zavodskaya laboratoriya*. 1985;51(9):56–57. (In Russ.).
- Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г., Кухтин Т.И., Штенгельмейер С.В. Свойства жидких доменных шлаков. Москва: Металлургия; 1975:180.
- Бёккер Ю. Спектроскопия. Москва: РИЦ Техносфера; 2009:528.
- Böcker J. Spektroskopie. Instrumentelle Analytik mit Atom- und Molekülspektrometrie. Würzburg: Vogel Buchverlag; 1997:519. (In Germ.).
- Zhang R., Wang Z., Meng Y., Jiao S., Jia J., Min Y., Liu C. Quantitative insight into aluminum structures in $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ system via Raman and ^{27}Al MAS-NMR spectroscopies. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;573:121116. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121116>
- Kim T.S., Park J.H. Structure-viscosity relationship of low-silica calcium aluminosilicate melts. *ISIJ International*. 2014;54(9):2031–2038. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2031>
- Gao J., Wen G., Huang T., Tang P., Liu Q. Effects of the composition on the structure and viscosity of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ -based mold flux. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2016;435:33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.01.001>
- Zheng D.-L., Ma G.-J., Zhang X., Liu M.-K., Xu J. Effect of $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on structure, viscosity, and surface tension of electroslag remelting-type CeO_2 -bearing slag. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2023;30:717–725. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00844-x>

20. Qi J., Liu C., Zhang C., Jiang M. Effect of Ce_2O_3 on structure, viscosity, and crystalline phase of $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Li}_2\text{O}-\text{Ce}_2\text{O}_3$. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017;48:11–16. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0850-3>
21. Zheng X., Liu C. Investigation of $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mass ratio on the properties and structure of Ce_2O_3 -containing $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ -based tundish flux. *ISIJ International*. 2022;62(3): 418–425. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-438>
22. Lin S.-L., Hwang C.-S. Structures of $\text{CeO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glasses. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1996;35(7R): 3975. <https://doi.org/10.1143/JJAP.35.3975>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Алена Геннадьевна Уполовникова, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-6698-5565
E-mail: upol.ru@mail.ru

Руслан Рафикович Шартдинов, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0003-0852-1161
E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

Артём Николаевич Сметанников, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-9206-0905
E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

Alena G. Upolovnikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-6698-5565
E-mail: upol.ru@mail.ru

Ruslan R. Shartdinov, Junior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-0852-1161
E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

Artem N. Smetannikov, Junior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-9206-0905
E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. Г. Уполовникова – анализ и обобщение результатов исследования.
Р. Р. Шартдинов – исследование структуры опытных образцов шлака.
А. Н. Сметанников – экспериментальные исследования физических свойств шлаков (температуры начала кристаллизации и вязкости).

A. G. Upolovnikova – analysis and generalization of research results.
R. R. Shartdinov – study of the structure of experimental slag samples.
A. N. Smetannikov – experimental studies of physical properties of slags (temperatures of crystallization onset and viscosity).

Поступила в редакцию 30.08.2023
 После доработки 12.10.2023
 Принята к публикации 16.10.2023

Received 30.08.2023
 Revised 12.10.2023
 Accepted 16.10.2023