



УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-743-749



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОСТИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$

А. А. Бабенко, Р. Р. Шартдинов[✉], А. Г. Уполовникова,
А. Н. Сметанников, Д. А. Лобанов, А. В. Долматов

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

✉ rr.shartdinov@gmail.com

Аннотация. В работе исследовано влияние основности на вязкость, температуру начала кристаллизации, фазовый состав и структуру шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-18\% \text{Cr}_2\text{O}_3-6\% \text{B}_2\text{O}_3-3\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ в диапазоне основности от 1,0 до 2,5 методами вибрационной вискозиметрии, термодинамического моделирования и рамановской спектроскопии. Физические свойства шлаков зависят от баланса процессов полимеризации и формирования фазового состава. Кислые шлаки основностью 1,0 относятся к категории «длинных» шлаков и характеризуются повышенной (до 34,1 %) долей высокотемпературных фаз. Однако, несмотря на то, что доля высокотемпературных фаз в 1,6 раза выше по сравнению с долей низкотемпературных фаз, они характеризуются более простой силикатной структурой, обеспечивая при температуре начала кристаллизации 1530 °С вязкость не более 0,25 Па·с. Рост основности (до 2,5) шлаков изучаемой оксидной системы, наряду с повышением (примерно в 5,9 раза) доли высокотемпературных фаз, сопровождается формированием более сложной силикатной структуры. Образующиеся четырехкоординационные структурные элементы $[\text{CrO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$ встраиваются в кремний-кислородную решетку и усложняют ее, что повышает степень полимеризации. Таким образом, при основности 2,5, в связи с высокой долей высокотемпературных фаз в шлаке и развитием процесса полимеризации, температура начала кристаллизации шлака возрастает до 1700 °С, а его вязкость достигает 1,0 Па·с при температуре 1670 °С.

Ключевые слова: АКР-шлак, оксид бора, оксид хрома, структура, вязкость, фазовый состав, температура начала кристаллизации

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию Института металлургии Уральского отделения РАН с использованием оборудования ЦКП «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Уполовникова А.Г., Сметанников А.Н., Лобанов Д.А., Долматов А.В. Влияние основности на физические свойства шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(6):743–749. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-743-749>

INFLUENCE OF BASICITY ON PHYSICAL PROPERTIES OF SLAGS OF THE $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ SYSTEM

A. A. Babenko, R. R. Shartdinov[✉], A. G. Upolovnikova,
A. N. Smetannikov, D. A. Lobanov, A. V. Dolmatov

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

✉ rr.shartdinov@gmail.com

Abstract. Influence of basicity on viscosity, crystallization onset temperature, phase composition, and structure of slags of the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-18\% \text{Cr}_2\text{O}_3-6\% \text{B}_2\text{O}_3-3\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ system in the basicity range ($B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$) from 1.0 up to 2.5 was studied using vibrational viscometry, thermodynamic modeling, and Raman spectroscopy. It was established that the physical properties of slags depend on the balance of polymerization degree and phase composition. Acid slags with a basicity of 1.0 belong to the category of “long” slags and are characterized by an increased proportion of high-temperature phases up to 34.1 %. However, despite the fact that the proportion of high-temperature phases is 1.6 times higher compared

to the proportion of low-temperature ones, they are characterized by a simpler silicate structure, providing a viscosity of no more than 0.25 Pa·s at a crystallization onset temperature of 1530 °C. An increase in basicity of slags of the studied oxide system (up to 2.5), along with an increase in the proportion of high-temperature phases (by almost 5.9 times), is accompanied by formation of a more complex silicate structure. The resulting four-coordination structural elements $[\text{CrO}_4]$ and $[\text{AlO}_4]$ are embedded in the silicate structure and complicate it, which increases the polymerization degree. Thus, at basicity of 2.5, due to a high proportion of high-temperature phases in the slag and development of polymerization process, slag crystallization onset temperature increases to 1700 °C and its viscosity reaches 1.0 Pa·s at a temperature of 1670 °C.

Keywords: AOD-slag, boron oxide, chromium oxide, structure, viscosity, phase composition, crystallization onset temperature

Acknowledgements: The work was performed according to the state assignment of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences using the equipment of the Shared Access Center “Composition of Compounds” of Institute of High Temperature Electronics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Babenko A.A., Shartdinov R.R., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N., Lobanov D.A., Dolmatov A.V. Influence of basicity on physical properties of slags of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6): 743–749. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-743-749>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным способом производства низкоуглеродистой нержавеющей стали на текущий момент является технология аргоноокислородного рафинирования (АКР). При этом процесс состоит из окислительного и восстановительного периодов. Вследствие высокого содержания оксида хрома в шлаках восстановительного периода проведение процессов восстановления хрома и десульфурации стали затрудняется из-за высокой вязкости и тугоплавкости формируемых шлаков. Именно поэтому в шлаки восстановительного периода плавки в качестве разжижителя добавляют плавленый шпат [1]. Однако плавленый шпат имеет ряд недостатков: он агрессивно воздействует на огнеупорную футеровку; вследствие образования экологически вредных летучих фторидов со временем изменяются состав шлаков и их физико-химические свойства [2], что вызывает необходимость поиска его замены. Одним из направлений решения проблемы может стать использование оксида бора, положительное воздействие которого на вязкость и температуру кристаллизации шлаков отмечено в работах [3–5]. При этом информация о влиянии оксида бора на физические свойства хромосодержащих шлаков практически отсутствует.

В настоящей работе при помощи вибрационной вискозиметрии, термодинамического моделирования фазового состава (HSC Chemistry 6.12 (Outokumpu)) и рамановской спектроскопии были изучены вязкость η , температура начала кристаллизации ($t_{\text{кр}}$), фазовый состав и структура шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ в диапазоне основности ($B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$) от 1,0 до 2,5, близкой по составу начала восстановительного периода процесса АКР [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования физических свойств шлаков изучаемой шестикомпонентной оксидной системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ были использованы шлаки, химический состав которых представлен в табл. 1.

Шлаки выплавляли в печи сопротивления в молибденовых тиглях в атмосфере аргона из прокаленных в течение 2–3 ч при температуре 800 °C (B_2O_3 – при 100 °C) оксидов марки ч.д.а.

Вязкость полученных шлаков измеряли при помощи вибрационного вискозиметра [7] в молибденовых тиглях в токе аргона, замер температуры проводили при использовании вольфрам-рениевой термодпары. Температуру начала кристаллизации шлаков определяли согласно теории вязкого течения Френкеля. Для этого строили графики в координатах $\ln \eta - 1/T$, перелом на которых отождествляется с температурой начала кристаллизации шлаков (далее температура кристаллизации) [8].

Термодинамическое моделирование фазового состава опытных образцов шлака проведено с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6.12 (Outokumpu) [9].

Структура опытных образцов шлака была исследована с использованием рамановского микроскопа-спектрометра U 1000 с лазером с возбуждающей длиной волны 532 нм. Полученные результаты представляют собой спектры в диапазоне волновых чисел 200–1600 cm^{-1} . Наблюдаемые линии спектра могут быть однозначно отнесены к колебаниям молекул исследуемого вещества. В зависимости от частоты колебаний, интенсивности и формы линий спектра можно судить о структуре исследуемого образца шлака [10].

Т а б л и ц а 1

Состав экспериментальных шлаков

Table 1. Composition of experimental slags

Шлак	Содержание, %						B	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$
	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃		
1	32,5	32,5	18,0	8,0	3,0	6,0	1,0	1530
2	39,0	26,0	18,0	8,0	3,0	6,0	1,5	1552
3	43,3	21,7	18,0	8,0	3,0	6,0	2,0	1614
4	46,4	18,6	18,0	8,0	3,0	6,0	2,5	1700

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты исследования вязкости шлаков в зависимости от температуры и их основности. На рис. 2 эти результаты представлены в координатах $\ln \eta - 1/T$, согласно которым определяли температуру кристаллизации (табл. 1).

В табл. 2 представлены результаты моделирования фазового состава опытных образцов шлака. Исходя из температур плавления, все фазы были условно разделены на три группы: низкотемпературные (1130 – 1280 °C), среднетемпературные (1460 – 1600 °C) и высокотемпературные (1710 – 2852 °C).

Рамановские спектры опытных образцов шлака с основностью 1,0 и 2,5 (шлаки 1 и 4) при постоянном содержании оксида хрома (18 %) и оксида бора (6,0 %) представлены на рис. 3, а соответствие волновых чисел пикам структурных элементов – в табл. 3.

Пики в районе волновых чисел 470 – 660 и 250 – 400 см^{-1} соответствуют симметричным валентным и деформационным колебаниям Si–O–Si. Находящиеся в этой области пики волновых чисел 550 см^{-1} относятся к связям Al–O–Al и Cr–O–Cr. С ростом основности шлаков они становятся менее выраженными; также менее выраженными становятся связи Si–O–Si.

Изменения в области волновых чисел 800 – 1200 см^{-1} показывают, что с увеличением основности (до 2,5) формируемого шлака на рамановском спектре появляются пики $[\text{CrO}_4]$ и Q_{Al}^3 в районе волновых чисел 873 и 780 см^{-1} , что говорит о наличии данных структурных элементов в шлаках с повышенной основностью. Рассматриваемые структурные элементы считаются полимеризаторами шлака [14; 19].

На рис. 3 отсутствуют пики, соответствующие трехкоординационному бору $[\text{BO}_3]$. Из этого следует, что оксид бора представлен в структуре шлака четы-

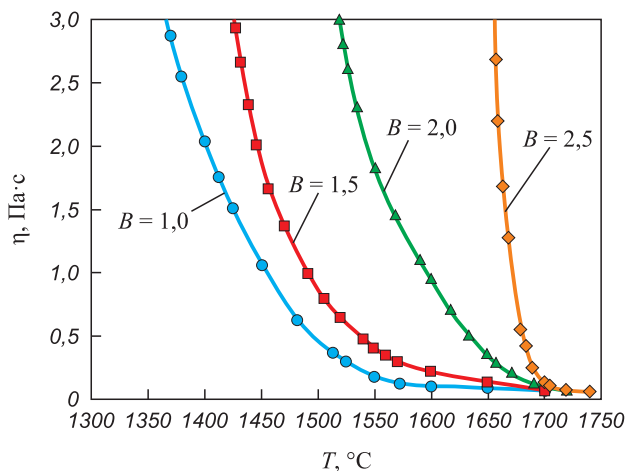


Рис. 1. Зависимость вязкости от температуры и основности шлаков изучаемой оксидной системы

Fig. 1. Dependence of viscosity on temperature and basicity of slags of the studied oxide system

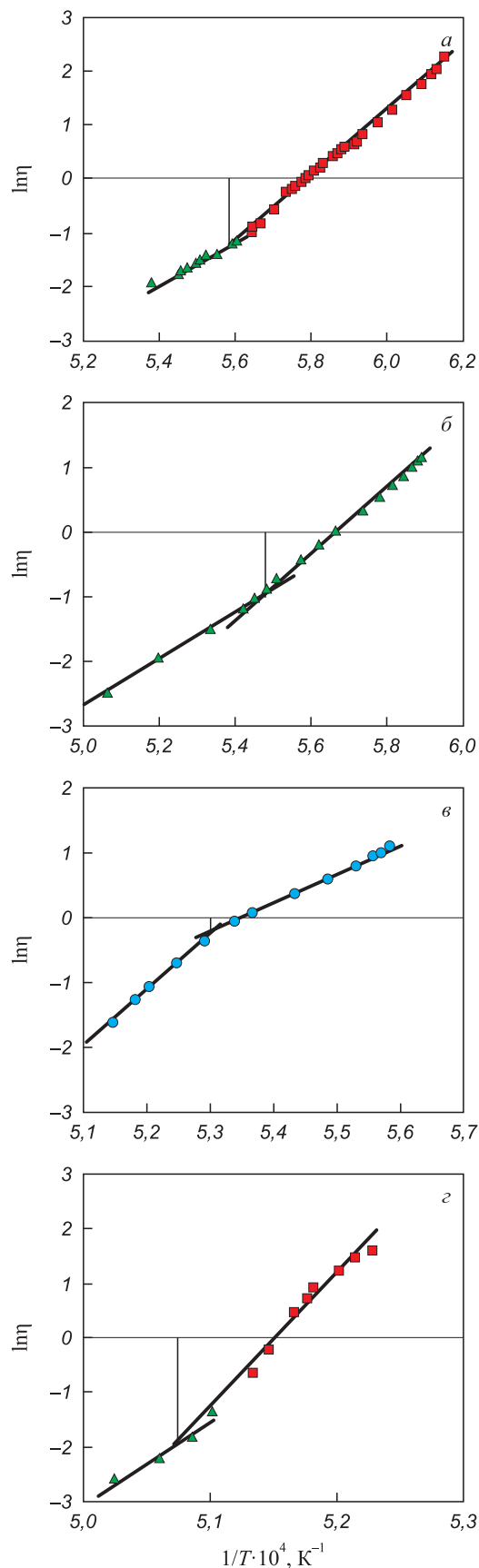


Рис. 2. Зависимость логарифма вязкости ($\ln \eta$) от обратной абсолютной температуры ($1/T$) шлаков 1 – 4 (a – d)

Fig. 2. Dependence of viscosity logarithm of ($\ln \eta$) on inverse absolute temperature ($1/T$) for slags 1 – 4 (a – d)

Т а б л и ц а 2

**Фазовый состав экспериментальных шлаков
при 1600 °С**

Table 2. Phase composition of experimental slags at 1600 °C

Фазовый состав	Температура плавления, °C	Содержание, %, в шлаке			
		1	2	3	4
Низкотемпературных фаз					
CB	1130	4,3	2,8	1,4	0,4
2CB	1280	8,3	10,1	10,7	8,4
CM2S	1391	9,2	5,6	2,0	0,3
Итого		21,8	18,5	14,1	9,1
Среднетемпературных фаз					
2CM2S	1454	3,0	3,4	2,7	1,0
3CB	1460	0,7	1,7	3,9	8,9
3C2S	1460	5,6	7,5	8,1	6,0
CMS	1503	7,7	9,9	10,9	8,4
CS	1540	15,9	13,1	9,0	4,6
CA2S	1550	3,6	1,8	0,4	0,02
MS	1557	5,8	4,0	2,0	0,5
3CM2S	1575	1,2	2,5	4,3	4,9
CA	1600	0,4	0,9	1,9	3,2
Итого		43,9	44,8	43,2	37,52
Высокотемпературных фаз					
S	1710	4,9	2,2	0,7	0,1
A	2040	1,4	1,8	1,7	1,0
2CS	2130	6,3	9,6	14,6	21,9
C	2570	0,2	0,4	0,7	2,2
M	2852	1,4	2,0	3,1	4,8
Cr	2435	12,8	10,3	6,8	3,0
CCr	2100	7,1	10,6	15,4	20,5
Итого		34,1	36,9	43,0	53,5

Примечание (обозначения фаз):

CB – CaO·B₂O₃; 2CB – 2CaO·B₂O₃;
3CB – 3CaO·B₂O₃; CS – CaO·SiO₂; 2CS – 2CaO·SiO₂;
3C2S – 3CaO·2SiO₂; C – CaO; CM2S – CaO·MgO·2SiO₂;
CMS – CaO·MgO·SiO₂; 2CM2S – 2CaO·MgO·2SiO₂;
3CM2S – 3CaO·MgO·2SiO₂; S – SiO₂; MS – MgO·SiO₂;
M – MgO; CA2S – CaO·Al₂O₃·2SiO₂; A – Al₂O₃;
CA – CaO·Al₂O₃; Cr – Cr₂O₃; CCr – CaO·Cr₂O₃.

рехкоординационным бором [BO₄]. Тетраэдры [BO₄] стремятся создать связи с атомами кремния, усложняя структуру, однако при этом снижаются ее однородность и прочность [20 – 22]. Ослаблением прочности структуры и образованием легкоплавких соединений объясняется понижение вязкости шлака при использовании такого оксида в качестве разжижителя.

Считается, что степень полимеризации шлака главным образом определяется высокочастотной силикатной областью волновых чисел 800 – 1200 см⁻¹, соот-

ветствующей тетраэдрам [SiO₄], поэтому для получения более подробной информации о структуре шлака была проведена деконволюция полученных рамановских спектров по методу Гаусса [23] (рис. 4). Это позволило представить степень полимеризации шлаков в виде показателя среднего количества мостикового кислорода BO, рассчитываемого по формуле:

$$BO = 0 \cdot Q_{Si}^0 + 1 \cdot Q_{Si}^1 + 2 \cdot Q_{Si}^2 + 3 \cdot Q_{Si}^3 + 4 \cdot Q_{Si}^4, \quad (1)$$

где Q_{Si}^n – [SiO₄] с n числом мостикового кислорода.

Результаты расчета среднего количества мостикового кислорода BO приведены в табл. 4.

Кислые шлаки основностью 1,0 (рис. 1, шлак 1) относятся к категории «длинных» шлаков, которые характеризуются повышенной (до 34,1 %) долей высокотемпературных фаз (табл. 2). Однако, несмотря на то, что доля высокотемпературных фаз в 1,6 раза выше по сравнению с долей низкотемпературных, шлаки основностью 1,0 характеризуются более простой силикатной структурой. Показатель среднего количества мостикового кислорода BO не превышает 0,55, что обусловлено, по-видимому, тем, что оксид хрома в кислых шлаках

Т а б л и ц а 3

Соответствие волновых чисел и структур

Table 3. Correspondence of wave numbers and structures

Элементы	Волновое число, см ⁻¹	Структуры	Ссылки
Q_{Si}^0	850 – 880	без мостикового кислорода в [SiO ₄]	[11; 12]
Q_{Si}^1	900 – 920	с 1 мостиковым кислородом в [SiO ₄]	
Q_{Si}^2	950 – 980	с 2 мостиковыми кислородами в [SiO ₄]	
Q_{Si}^3	1040 – 1060	с 3 мостиковыми кислородами в [SiO ₄]	
Q_{Si}^4	1060, 1190	с 4 мостиковыми кислородами в [SiO ₄]	[13]
Si–O–Si	500 – 650	деформационные колебания Si – O ⁰	
Al–O–Al	550	валентные колебания Al – O ⁰	
Cr–O–Cr	520 – 540	валентные колебания Cr – O ⁰	
[CrO ₄]	873	валентные колебания Cr – O ⁰	[16]
[BO ₃]	1350 – 1530	валентные колебания B – O ⁻ в [BO ₃] ⁻	[17; 18]
[BO ₄]	900 – 920	валентные колебания B – O ⁰ в [BO ₄]	[18]
Q_{Al}^3	780	с 3 мостиковыми кислородами в [AlO ₄]	[14]

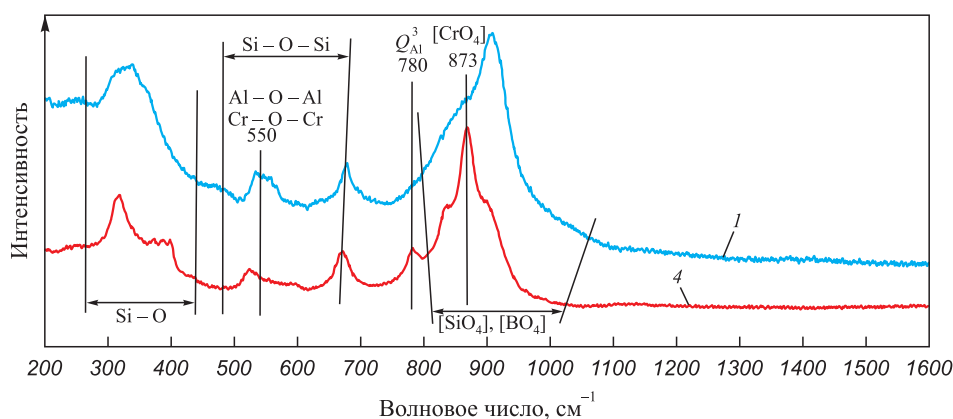


Рис. 3. Рамановские спектры шлаков 1 и 4

Fig. 3. Raman spectra of slags 1 and 4

проявляет основные свойства [24; 25]. Он оказывает деполимеризующее воздействие на кремне-кислородную решетку. В результате большая часть (0,64) силикатных структурных элементов представлена $[\text{SiO}_4]$ без мостикового кислорода. Такая простая структура шлака (основностью 1,0), несмотря на повышенную в 1,6 раза долю высокотемпературных фаз, обеспечивает при тем-

пературе кристаллизации 1530 °С достаточно высокую его жидкоподвижность. При температуре кристаллизации и выше вязкость шлака не превышает 0,25 Па·с.

С повышением основности шлаков изучаемой оксидной системы сохраняется тенденция увеличения доли высокотемпературных и снижения доли низкотемпературных фаз (табл. 2). Например, шлак основностью 2,5 (шлак 4, рис. 1) относится уже к категории «коротких» шлаков (табл. 2), характеризуется повышенной (до 53,5 %) долей высокотемпературных фаз преимущественно за счет $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (21,9 %) и $\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (20,5 %) и сокращением (до 9,1 %) низкотемпературных фаз из-за снижения доли $\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ до 0,4 и 0,3 % соответственно. При этом, несмотря на рост основности формируемого шлака и образование структурного элемента $[\text{BO}_4]$, присутствие оксидов хрома и алюминия, которые ведут себя как кислые оксиды [14; 19; 20], сопровождается повышением степени полимеризации шлака. Четырехкоординатные хром $[\text{CrO}_4]$ и алюминий $[\text{AlO}_4]$ встраиваются в кремний-кислородную решетку, усложняя ее. В этом случае показатель среднего количества мостикового кислорода ВО увеличивается до 0,73. Главным образом это происходит за счет того, что большая часть (0,52) силикатных структурных элементов представлена $[\text{SiO}_4]$ с одним мостиковым кислородом. Такая сложная силикатная структура шлака основностью 2,5 с повышенной (примерно в 5,9 раза) долей высокотемпературных фаз

Т а б л и ц а 4

Количество силикатных структурных элементов
Table 4. Fractions of silicate structural elements

Шлак	B	Количество структурных элементов, доли				ВО
		Q_{Si}^0	Q_{Si}^1	Q_{Si}^2	Q_{Si}^3	
1	1,0	0,64	0,17	0,19	0	0,55
4	2,5	0,37	0,52	0,11	0	0,73

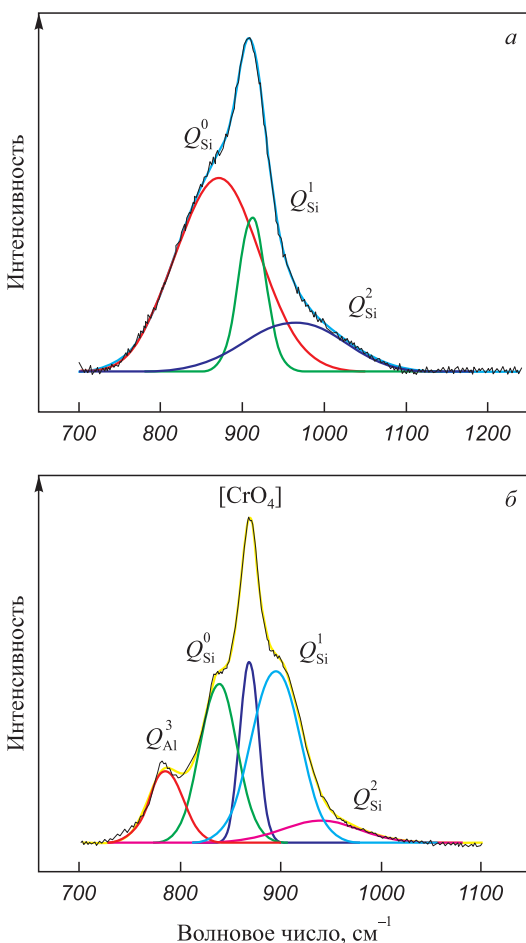


Рис. 4. Результаты деконволюции шлаков 1 (а) и 4 (б)

Fig. 4. Results of deconvolution of slags 1 (a) and 4 (b)

относительно низкотемпературных обеспечивают рост температуры кристаллизации до 1700 °С и вязкости до 1,0 Па·с и выше при температуре 1670 °С и ниже.

Выводы

Получены новые данные о влиянии основности шлаков изучаемой оксидной системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-18\% \text{Cr}_2\text{O}_3-6\% \text{B}_2\text{O}_3-3\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ на фазовый состав, структуру, вязкость и температуру начала кристаллизации.

Установлено, что физические свойства шлаков зависят от особенностей формирования баланса между процессами полимеризации и фазовым составом:

– при низкой основности 1,0 оксид хрома проявляет основные свойства, в результате чего шлак имеет достаточно простую структуру и значение показателя ВО составляет 0,55, что обеспечивает низкую вязкость 0,25 Па·с при температуре начала кристаллизации 1530 °С, несмотря на высокое содержание высокотемпературных фаз;

– напротив, с ростом основности до 2,5 степень полимеризации шлака возрастает ($\text{ВО} = 0,73$), так как Cr_2O_3 проявляет кислые свойства, что выражается с образованием в шлаке структурной единицы $[\text{CrO}_4]$. В то же время содержание высокотемпературных фаз возрастает в 1,57 раза. В совокупности с усложнением структуры это повышает вязкость шлака до 1,0 Па·с при температуре 1670 °С и его температуру начала кристаллизации до 1700 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kalicka Z., Kawecka-Cebula E., Pytel K. Application of the Iida model for estimation of slag viscosity for $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{CaF}_2$. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2009;54(1):179–187.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. *Производство стали. В 3-х томах. Т. 3. Внепечная металлургия стали*. Москва: Теплотехник; 2010:544.
3. Wang H.M., Li G.R., Li B., Zhang X.J., Yan Y.Q. Effect of B_2O_3 on melting temperature of cao-based ladle refining slag. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010;17(10):18–22. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60177-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60177-X)
4. 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;295–297:2647. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.295-297.2647>
5. Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Уполовникова А.Г., Сметанников А.Н., Гуляков В.С. Физические свойства шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, содержащей 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO . *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(10):769–773. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-769-773>
6. Babenko A.A., Shartdinov R.R., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N., Gulyakov V.S. Physical properties of slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ system containing 15 % of Al_2O_3 and 8 % of MgO . *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):769–773. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-769-773>
7. Токовой О.К. *Аргониксислородное рафинирование нержавеющей стали*. Челябинск: ИЦ ЮУрГУ; 2015:250.
8. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Богачев В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром. *Заводская лаборатория*. 1985;51(9):56–57.
9. Shtengel'meyer 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.).
10. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г., Кухтин Т.И., Штенгельмейер С.В. *Свойства жидких доменных шлаков*. Москва: Металлургия; 1975:180.
11. Roine A. *HSC 6.0 Chemistry Reactions and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database and Flowshut*. Pori: Outokumpu Research Oy; 2006:448.
12. Бёккер Ю. *Спектроскопия* / Пер. Л.Н. Казанцева. Москва: РИЦ Техносфера, 2009:528.
13. Böcker J. *Spektroskopie: Instrumentelle Analytik mit Atom- und Molekülspektrometrie*. Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG; 1997:519. (In Germ.).
14. McMillan P. Structural studies of silicate glasses and melts-applications and limitations of Raman spectroscopy. *American Mineralogist*. 1984;69(6):622–644.
15. Matson D.W., Sharma S.K., Philpotts J.A. The structure of high-silica alkali-silicate glasses. A Raman spectroscopic investigation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1983;58(2–3):323–352. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(83\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0022-3093(83)90032-7)
16. McMillan P.F., Poe B.T., Gillet P.H., Reynard B. A study of SiO_2 glass and supercooled liquid to 1950 K via high-temperature Raman spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001;58(17):3653–3662. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90156-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90156-2)
17. 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>
18. Dines T.J., Inglis S. Raman spectroscopic study of supported chromium (VI) oxide catalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2003;5(6):1320–1328. <https://doi.org/10.1039/b211857b>
19. Weckhuysen B.M., Wachs I.F. Raman spectroscopy of supported chromium oxide catalysts. Determination of chromium–oxygen bond distances and bond orders. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1996;92(11):1969–1973. <https://doi.org/10.1039/FT9969201969>
20. Kim Y., Morita K. Relationship between molten oxide structure and thermal conductivity in the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ system. *ISIJ International*. 2014;54(9):2077–2083. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2077>
21. Cochain B., Neuville D.R., Henderson G.S., McCammon C.A., Pinet O., Richet P. Effects of the iron content and redox state on the structure of sodium borosilicate glasses: A Raman, Mössbauer and boron K-Edge XANES spectroscopy study. *Journal of the American Ceramic Society*. 2012;95(3):962–971. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.05020.x>
22. Li Q., Gao J., Zhang Y., An Z., Guo Z. Viscosity measurement and structure analysis of Cr_2O_3 -bearing $\text{CaO}-\text{SiO}_2-$

- MgO–Al₂O₃ slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017;48:346–356.
<https://doi.org/10.1007/s11663-016-0858-8>
20. Xu R.Z., Zhang J.L., Wang Z.Y., Jiao K.X. Influence of Cr₂O₃ and B₂O₃ on viscosity and structure of high alumina slag. *Steel Research International*. 2017;88(4):1600241.
<https://doi.org/10.1002/srin.201600241>
 21. Sun Y., Zhang Z. Structural roles of boron and silicon in the CaO–SiO₂–B₂O₃ glasses using FTIR, Raman, and NMR spectroscopy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015;46:1549–1554.
<https://doi.org/10.1007/s11663-015-0374-2>
 22. Cai Z., Song B., Li L., Liu Zh., Cui X. Effects of B₂O₃ on viscosity, structure, and crystallization of mold fluxes for casting rare earth alloyed steels. *Metals*. 2018;8(10):737.
<https://doi.org/doi:10.3390/met8100737>
 23. Mysen B.O., Virgo D., Scarfe C.M. Relations between the anionic structure and viscosity of silicate melts – a Raman spectroscopic study. *American Mineralogist*. 1980;65(7):690–710.
 24. Forsbacka L., Holappa L., Kondratiev A., Jak E. Experimental study and modelling of viscosity of chromium containing slags. *Steel Research International*. 2007;78(9):676–684.
<http://dx.doi.org/10.1002/srin.200706269>
 25. Wu T., Zhang Y., Yuan F., An Z. Effects of the Cr₂O₃ content on the viscosity of CaO–SiO₂–10 Pct Al₂O₃–Cr₂O₃ quaternary slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;49:1719–1731.
<https://doi.org/10.1007/s11663-018-1258-z>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Анатолий Алексеевич Бабенко, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН
 ORCID: 0000-0003-0734-6162
 E-mail: babenko251@gmail.com

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

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

Артем 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

Даниил Андреевич Лобанов, к.т.н., научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН
 ORCID: 0009-0007-5659-1208
 E-mail: summerdanny@yandex.ru

Алексей Владимирович Долматов, к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории металлургических расплавов, Институт металлургии Уральского отделения РАН
 ORCID: 0000-0002-6632-9533
 E-mail: dolmatov.imet@gmail.com

Anatolii A. Babenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
 ORCID: 0000-0003-0734-6162
 E-mail: babenko251@gmail.com

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

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

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

Daniil A. Lobanov, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Institute of Metallurgy Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
 ORCID: 0009-0007-5659-1208
 E-mail: summerdanny@yandex.ru

Aleksei V. Dolmatov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Laboratory of Metallurgical Melts, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
 ORCID: 0000-0002-6632-9533
 E-mail: dolmatov.imet@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. А. Бабенко – руководство, анализ результатов, написание статьи, редактирование статьи.
Р. Р. Шартдинов – проведение эксперимента, обработка и анализ результатов, написание статьи, редактирование статьи.
А. Г. Уполовникова – моделирование, анализ результатов, редактирование статьи.
А. Н. Сметанников – проведение эксперимента, анализ результатов.
Д. А. Лобанов – проведение эксперимента, анализ результатов.
А. В. Долматов – обработка и анализ результатов.

A. A. Babenko – scientific guidance, data analysis, writing and editing the text.
R. R. Shartdinov – conducting the experiment, data processing and analysis, writing and editing the text.
A. G. Upolovnikova – modeling, data analysis, editing the text.
A. N. Smetannikov – conducting the experiment, data analysis.
D. A. Lobanov – conducting the experiment, data analysis.
A. V. Dolmatov – data processing and analysis.

Поступила в редакцию 14.04.2023
 После доработки 06.07.2023
 Принята к публикации 11.09.2023

Received 14.04.2023
 Revised 06.07.2023
 Accepted 11.09.2023