



Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$

Н.В. Немчинова^{1✉}, А.А. Ильин², А.А. Тютрин³, С.В. Галачиева⁴,
А.А. Яковлева⁵

^{1-3,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан

⁴Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Резюме. Цель – изучение корреляционных зависимостей между динамической вязкостью шлаков и параметрами их структуры для определения оптимальной основности шлака кремниевой плавки при добавлении (для устранения ошлакования подины рудотермической печи) оксида бора. Экспериментальные исследования проводились на модельных шлаках CaO-SiO_2 , $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, полученных при 1600°C. Рамановский спектроскопический анализ проводился на анализаторе Horiba Jobin-Yvon HR800UV (Франция). Теоретические расчеты вязкости шлаков осуществлялись с применением моделей Урбена и Миллса. В ходе экспериментов фундаментальные показатели, описывающие структуру шлаковых систем, варьировались в пределах: экспериментальная функция деконволюции спектра Рамана от 1,41 до 2,45, оптическая основность от 0,58 до 0,68. Полученные экспериментальные и теоретические данные были связаны математическими зависимостями. Установлено, что динамическая вязкость шлака может быть оперативно определена методом рамановской спектроскопии на основе математических моделей. Полученная зависимость показывает, что вязкость шлака снижается при увеличении числа мостиковых атомов кислорода в структуре силикатного аниона. При этом снижение вязкости шлака наблюдается до величины для экспериментальной функции деконволюции спектра Рамана ~1,55–1,60 или оптической основности шлака 0,60–0,62; при добавлении B_2O_3 вязкость далее снижается. На практике для шлаков системы CaO-SiO_2 использование в качестве разжижающего агента борсодержащего флюса целесообразно при $\text{CaO/SiO}_2 = 0,61\text{--}0,63$ при поддержании содержания B_2O_3 в составе шлака на уровне 1%. Показано, что для теоретического расчета вязкости в системах CaO-SiO_2 , $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ более подходят две модели (классическая и модифицированная), предложенные Урбеном. Показано, что модель Миллса не подходит для этих целей, так как коэффициенты корреляции в соответствующей математической модели недостаточно велики. Необходимо продолжение работ в данном направлении с целью установления соответствующих зависимостей вязкости от параметров структуры шлаков при различных температурах с целью поиска обобщающих закономерностей.

Ключевые слова: металлургия кремния, структура шлака, рамановская спектроскопия, функция деконволюции спектра Рамана, оптическая основность, вязкость, оксид бора

Для цитирования: Немчинова Н.В., Ильин А.А., Тютрин А.А., Галачиева С.В., Яковлева А.А. Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 562–575. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.

METALLURGY

Original article

Structure and dynamic viscosity of CaO-SiO_2 and $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ model slag systems

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Alexander A. Ilin², Andrey A. Tyutrin³,
Svetlana V. Galachieva⁴, Ariadna A. Yakovleva⁵

^{1-3,5}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan

⁴North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Correlation dependencies between the dynamic viscosity of slag and its structural parameters were studied to determine an optimal basicity of silicon smelting slag under the addition of boron oxide to eliminate

slagging of the bottom of ore-smelting furnaces. Experimental studies were conducted on CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ model slags obtained at 1600 °C. Raman spectroscopic analysis was carried out using a Horiba Jobin-Yvon HR800UV analyzer (France). Theoretical calculations of slag viscosity were performed using Urbain and Mills models. During the experiments, the key structural parameters of slag systems varied within the following limits: the experimental Raman spectrum deconvolution function from 1.41 to 2.45 and optical basicity from 0.58 to 0.68. The obtained experimental and theoretical data were related by mathematical dependencies. It was found that the dynamic viscosity of slag can be promptly determined by Raman spectroscopy on the basis of mathematical models. The dependence obtained shows that slag viscosity decreases upon an increase in the number of bridging oxygen atoms in the silicate anion structure. Notably, this decrease in slag viscosity is observed up to the value of the experimental Raman spectrum deconvolution function of ~1.55–1.60 or slag optical basicity of 0.60–0.62. When B₂O₃ is added, the viscosity undergoes a further decrease. In practice, for CaO–SiO₂ slag systems, the use of boron-containing flux as a liquefying agent is reasonable at CaO/SiO₂ = 0.61–0.63 while maintaining the content of B₂O₃ in the slag at a level of 1%. The two models (classical and modified) proposed by Urbain were established to be more suitable for theoretical calculation of viscosity in CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ systems. Mills' model is not suitable for these purposes, since the correlation coefficients in the corresponding mathematical model are not sufficiently large. Further research in this direction is required in order to establish appropriate dependencies of slag viscosity on its structural parameters at different temperatures.

Keywords: silicon metallurgy, slag structure, Raman spectroscopy, Raman spectrum deconvolution function, optical basicity, viscosity, boron oxide

For citation: Nemchinova N.V., Ilin A.A., Tyutrin A.A., Galachieva S.V., Yakovleva A.A. Structure and dynamic viscosity of CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ model slag systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):562–575. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.

ВВЕДЕНИЕ

В практике металлургического производства важной прикладной задачей является поиск составов металлургических шлаков, обеспечивающих оптимальное протекание физико-химических превращений, сопровождающих процесс выплавки металлов и сплавов. В большинстве случаев для придания шлакам необходимых технологическому процессу свойств используют добавление в шихту различных флюсов. В качестве флюсов используются материалы, содержащие оксиды кремния, кальция, железа, бора, а также соответствующие хлориды, фториды и т.д. [1–7]. Флюсы наряду с формированием шлака определенного состава с требуемой температурой пирометаллургического процесса, улучшения электропроводности шлака обеспечивают снижение вязкости металлургических шлаков в зависимости от потребностей технологии.

Однако флюсы могут способствовать загрязнению готовой продукции вредными примесями. Так, специфика выплавки технического кремния состоит в том, что бор может восстановиться из печных шлаков и перейти в кремниевую фазу; бор является вредной примесью, которая снижает качество готового кремниевого материала, направляемого в дальнейшем на производство солнечных

элементов (бор при направленной кристаллизации практически не удаляется из кремния). Поэтому количество вводимых флюсов в состав шихты плавки должно быть оптимальным. В этой связи актуальным является вопрос проведения фундаментальных исследований, позволяющих изучить взаимосвязи между различными физико-химическими характеристиками шлаков и особенностями их структуры с целью разработки рационального состава шлакообразующих систем при добавке флюсов.

Изучаемый нами технологический процесс – получение кремния в рудовосстановительных печах⁶ [8, 9]. Большинство шлаковых систем в металлургии базируется на двух главных оксидах – CaO и SiO₂, изучению свойств их бинарной системы посвящено множество работ. Перспективным модификатором, который значительно влияет на физические свойства шлаков, является оксид бора [10, 11]. Поэтому в данной работе совместно с системой, основанной на главных компонентах, рассматривается система с добавкой оксида бора – CaO–SiO₂–B₂O₃.

Одной из важнейших характеристик шлаковых расплавов является вязкость. Вязкость, как известно, является мерой текучести. Размеры структурных компонентов, присутствующих в расплаве, составляют препят-

⁶Минеев Г.Г., Минеева Т.С., Жучков И.А., Зелинская Е.В. Теория металлургических процессов: учебник. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. 522 с.

ствие для его движения. В составе шлаков укрупнение структурных компонентов часто связано с наличием в шлаке SiO_2 . Поскольку силикаты содержат различные структурные блоки, возникающие за счет полимеризации простейших кремниевых ионов с различными размерами [12], вязкость расплавов силикатов должна быть функцией структуры.

Двумя параметрами, полезными для прогнозирования структуры шлака, являются степень полимеризации, определяемая как отношение несвязанных ионов кислорода к тетраэдрически координированным катионам (NBO/T), и оптическая основность (Λ). Считается, что использование оптической основности вместо отношения NBO/T представляет преимущества при описании структуры силиката [13]. NBO/T рассчитывается по уравнению (1):

$$\frac{\text{NBO}}{\text{T}} = \frac{\sum nM_i^{n+}}{\text{T}}, \quad (1)$$

где M_i – мольная доля катиона после вычета пропорции, необходимой для балансировки заряда; n – заряд катиона; T – количество тетраэдрически координированных катионов.

Более подробное описание процедуры расчета NBO/T можно найти в известной учебной литературе по геологии, геохимии или в специальной литературе [14].

Другой параметр для оценки корреляции структурных изменений силикатов при добавлении модифицирующих оксидов – это оптическая основность. Большинство химических взаимодействий включает передвижение электронов от одного атома к другому. Эти взаимодействия описывают характеристики кислот и оснований. Расплавленные силикатные системы можно описывать с использованием теории кислот и оснований Льюиса [15]. Льюисово основание определяется как вещество, которое может отдать пару электронов, а льюисова кислота – как вещество, которое может принять пару электронов. Химическая связь между акцептором и донором фокусируется на выявлении степени отдачи электронов. Оптическая основность при этом является параметром силы донора электронов [15]. Исследования, касающиеся свойств льюисовых кислот и оснований, были ограничены водными системами, пока Даффи и Инграм не предложили

ее использование для изучения стекол [16]. Результаты их экспериментальных измерений оптической основности оксидов были обработаны с получением уравнения (2), которое связывает оптическую основность с электроотрицательностью по Полингу:

$$\Lambda = \frac{x_c}{\gamma}, \quad (2)$$

где x_c – доля катиона; γ – параметр умеренности основности.

Параметр умеренности основности рассчитывается с использованием отношения, показанного в уравнении (3):

$$\gamma = 1,36(x - 0,26), \quad (3)$$

где x – электроотрицательность по Полингу.

Наиболее важным параметром является еще один фундаментальный показатель, который позволяет лучше понять природу шлака. Это функция деконволюции (Q_{exp}^n), которую можно получить на основе данных спектров Рамана шлаковой системы. Функция Q_{exp}^n является производной от соотношения NBO/T и выражена уравнением (4):

$$4Q^0 + 3Q^1 + 2Q^2 + Q^3 = Q_{\text{exp}}^n, \quad (4)$$

где Q^n – параметр для описания видов силикатных анионов, которые возможно рассчитать на основании деконволюции экспериментально полученных спектров Рамана; n – количество мостиковых кислорода (0, 1, 2, 3), соединяющих соседние полиэдры в силикатных стеклах, в том числе и в борном ангидриде.

Оценку вязкости изучаемых шлаковых расплавов производили теоретическим путем на основе признанной в научном сообществе модели Урбена [17] и ее модификации [18], а также на основании модели, базирующейся на использовании в расчетах оптической основности, известной также как модель NPL (от англ. National Physical Laboratory), разработанной Милсом и Шридхаром [19–21]. Отличие моделей Урбана заключается в допущении, что оксид бора – амфотерный (классический вариант модели) и кислотный (модифицированный вариант). Выбор теоретического способа определения вязкости шлака связан с тонкой настройкой

величины вязкости шлака, которую не обеспечивают экспериментальные способы определения.

Существует много методов прямого экспериментального определения вязкости шлака: ротационный, вибрационный и т.д. [22]. Недостаток применения этих методов в том, что они определяют вязкость в идеализированных условиях. Плавка в печи происходит в условиях неопределенности в части температуры, величины окислительно-восстановительного потенциала атмосферы печи и других параметров, которые могут повлиять на вязкость. В этой связи в данной работе мы изучали воздействие модификаторов шлака по косвенным, но более фундаментальным показателям (NBO/T , Λ , Q_{exp}^n), которые дают возможность судить о природе шлака как о системе с заряженными частицами, структурированными определенным образом.

МЕТОДЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В наших исследованиях было подготовлено 11 вариантов модельных шлаков: 5 вариантов – системы CaO–SiO₂; 6 вариантов – системы CaO–SiO₂–B₂O₃. Общая масса каждого из модельных шлаков составляла 300 г. Для приготовления модельных шлаков использовали реагенты технической чистоты CaO (99,5%), SiO₂ (99,8%) и B₂O₃ (99,8%). Эти материалы загружались в различных пропорциях в графитовый тигель. После вакуумирования печи вводился аргон для минимизации окисления графитового тигля. Тигель нагревался в индукционной печи мар-

ки IT-KTV-80/115/1650 компании Linn High Therm (Германия) для расплавления материала при температуре от 1973 К до 2073 К (от 1700 °С до 1800 °С). После расплавления всех твердых веществ содержимое выливалось на водяной охлаждаемый медный блок для закалки. Затем материал измельчался до порошкообразного состояния в вибрационной дисковой мельнице марки RS 200 компании «Retsch» (Германия) с мелющими телами из карбида вольфрама. Операции плавления и дробления повторялись три раза для достижения однородности порошка. Порошок истирали до размера частиц менее 250 мкм. Образцы хранились в пластиковых мешках в эксикаторе для минимизации поглощения влаги и других примесей.

На последнем этапе проводили плавку образцов (по 2 г) в платиновых тиглях при температуре 1873 К (1600 °С). Образцы выдерживались при этой температуре в течение 1 ч. После выдержки дно платинового тигля погружалось в холодную воду для формирования стекловидного образца. Скорость охлаждения составляла около 10²–10³ К/с. Потери массы после плавления составили 0,4–0,5%. Образцы полученных стекол анализировали методом рамановской спектроскопии [23].

В табл. 1 представлены химический состав, рассчитанные значения параметров структуры шлаков и вязкости для системы CaO–SiO₂, в табл. 2 – для системы CaO–SiO₂–B₂O₃, включая сравнение с исследованиями автора⁷. Отсутствие отношения NBO/T для

Таблица 1. Химический состав стекол и соответствующие значения NBO/T , Λ , Q_{exp}^n динамической вязкости для системы CaO–SiO₂

Table 1. Chemical composition of glasses and the corresponding values of NBO/T , Λ , Q_{exp}^n of dynamic viscosity for CaO–SiO₂ system

№ шлака	Содержание в шлаке, % масс.		Основность (CaO/SiO ₂)	NBO/T	Λ	Q_{exp}^n	Вязкость шлака*, Па·с
	SiO ₂	CaO					
1	63,57	36,43	0,573	1,21	0,580	1,41	1,585 / 0,891
2	57,92	42,08	0,680	1,46	0,590	1,48	1,000 / 0,708
3	56,38	43,62	0,820	1,75	0,598	1,50	0,631 / 0,603
4	50,14	49,86	0,990	2,13	0,600	1,50	0,589 / 0,550
5	44,9	55,1	1,200	2,57	0,608	1,57	0,398 / 0,380

* – расчетные данные по моделям Урбена: числитель – классический вариант, знаменатель – модифицированный вариант

⁷Шартдинов Р.Р. Влияние физико-химических характеристик шлаков аргоноокислородного рафинирования на восстановление хрома, бора и десульфурацию нержавеющей стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.6.2. Екатеринбург, 2023.

Таблица 2. Химический состав стекол и соответствующее значение Λ , Q^n_{exp} динамической вязкости для системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ **Table 2.** Chemical composition of glasses and corresponding value of Λ , Q^n_{exp} of dynamic viscosity for $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system

№ шлака	Содержание в шлаке, % масс.			Основность (CaO/SiO_2)	Λ	Q^n_{exp}	Вязкость шлака, Па·с	
	SiO_2	CaO	B_2O_3				Расчет по Урбену	Эксперимент по Шартдинову
6	62,92	35,88	1,2	0,570	0,630	1,70	0,257 / 0,257	–
7	60,12	34,08	5,8	0,567	0,645	1,95	0,282 / 0,200	–
8	56,98	32,32	10,7	0,567	0,652	2,10	0,200 / 0,195	–
9	45,32	53,58	1,1	1,182	0,663	2,20	0,224 / 0,170	0,20
10	42,99	51,61	5,4	1,201	0,677	2,40	0,166 / 0,158	0,12
11	40,57	49,53	9,9	1,221	0,680	2,45	0,126 / 0,155	–

системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ обусловлено невозможностью определения точного распределения B^{3+} и B^{4+} в системе.

Рамановский спектроскопический анализ проводился на спектральном анализаторе марки Horiba Jobin–Yvon HR800UV (Франция). В качестве источника возбуждения использовался аргон-кадмиевый лазер с длиной волны 315 нм. Мощность лазера на образце составляла ~25 мВт для Ar/Cd. Голографическая дифракционная решетка имела 2200 штрихов/мм для лазера с длиной волны 315 нм и фокусировалась на детектор CCD. В качестве объектива был использован Olympus 412 UV для Ar/Cd. Измерения проводились в диапазоне от 500 до 1200 см^{-1} . Фильтр для снижения излучения, поступающего в детектор от образцов, не использовался.

Сущность метода состоит в том, что при прохождении лазерного луча с длиной волны 315 нм (волновое число около 31000 см^{-1}) через изучаемый образец шлака происходит поглощение энергии волны и, соответственно, длина волны увеличивается (волновое число снижается ~ на 2–5%). Детектор оценивает энергию всех рассеянных частиц, прошедших через образец шлака по величине волнового числа. Программа обработки данных прибора производит деконволюцию спектров по методу, описанному в [24, 25], т.е. вычитает из исходного волнового числа волновые числа рассеянных частиц, оценивает статистическое распределение этой разницы и рассчитывает долевое содержание каждой составляющей шлаковой системы, идентифицированной пиком на спектро-

грамме, пропорционально площади пика относительно базовой линии спектрограммы. Предварительно выполнена коррекция базовой линии на исходных спектрах перед нормализацией данных. Нормализация данных помогает сравнивать небольшие отклонения в спектрах. Формула для нормализации данных описана в [26].

Прибор калибровался на воздухе с использованием кремния электронного качества. Образцы стекла анализировались на угольной подложке в ориентации образцов плоскими гранями к объективу микроскопа. Измерения проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре. Не было обнаружено увеличения температуры при прикосновении к образцам под воздействием лазера. Была проведена оценка согласованности данных для обеспечения точного их толкования и однородности образца. Измерения проводились в трех разных местах на образце шлака для того, чтобы удостовериться в отсутствии сегрегации во время закалки. Кроме того, проводились три параллельных измерения для проверки стабильности прибора и образцов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате интерпретации спектров Рамана были выявлены 4 вида шлаковых структур с различным количеством мостиковых атомов кислорода, описываемые функцией Q^n во всех изученных образцах шлаков. На рис. 1 [12] и в табл. 3 представлены данные относительно каждой из разновидностей шлаковых структур. В результате деконволю-

ции спектров были получены данные о содержании каждой разновидности шлаковой структурной единицы в общем объеме шлаковой фазы. Для всех 11 изученных образцов шлаков эти данные представлены в табл. 4.

На основе полученных данных о содержании разных видов силикатных анионов по формуле (4) рассчитывали функции деконволюции спектров Рамана экспериментальных образцов шлаков (Q^n_{exp}).

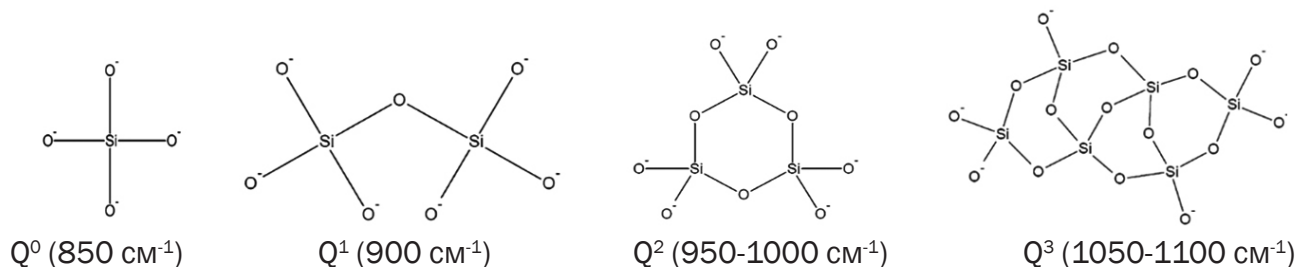


Рис. 1. Функции описания (Q^n) и соответствующие им особенности структуры силикатных анионов с разным количеством мостиковых атомов кислорода и сдвиги Рамана

Fig. 1. Description functions (Q^n) and corresponding to them structural features of silicate anions with the different number of bridging oxygen atoms and Raman shifts

Таблица 3. Сводка по сдвигам Рамана для видов Q^n , NBO/T и соответствующих структурных единиц силиката [27]
Table 3. Summary of Raman shifts for Q^n , NBO/T types and corresponding silicate structural units [27]

Виды Q	NBO/T	Рамановский сдвиг, cm^{-1}	Силикатные структурные единицы
Q^0	4	850	SiO_4
Q^1	3	900	$-\text{SiO}_3$
Q^2	2	от 950 до 1000	$=\text{SiO}_2$
Q^3	1	с 1050 до 1100	$\equiv\equiv\text{SiO}$

Таблица 4. Средние значения с пределами погрешности определения сдвига Рамана и содержания структурных единиц шлаковой фазы Q^n по видам (при температуре 1600 °C)

Table 4. Average values with the threshold errors of determination of Raman shift and content of slag phase Q^n structural units by types (at the temperature of 1600 °C)

Виды Q^n		Q^0	Q^1	Q^2	Q^3
Сдвиг Рамана, cm^{-1}		861 ± 1,7	907 ± 2,1	964 ± 1,2	1048 ± 2,6
Содержание, %	№ шлака				
	1	3,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	39 ± 0,7	57 ± 0,5
	2	4,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	42 ± 0,9	53 ± 0,5
	3	8 ± 0,5	4 ± 0,2	48 ± 0,9	40 ± 0,5
	4	17 ± 0,3	6 ± 0,2	50 ± 0,9	27 ± 0,5
	5	26 ± 0,4	8 ± 0,2	51 ± 0,9	15 ± 0,5
	6	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	39 ± 0,5	59 ± 0,8
	7	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	36 ± 0,5	60 ± 0,9
	8	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	31 ± 0,5	65 ± 0,9
	9	24 ± 0,4	8 ± 0,2	51 ± 0,9	17 ± 0,4
	10	17 ± 0,3	8 ± 0,2	47 ± 0,9	28 ± 0,5
	11	13 ± 0,3	4 ± 0,2	45 ± 0,9	38 ± 0,5

Для оценки адекватности полученных экспериментальных данных нами было проверено наличие корреляции между теоретически рассчитанными величинами (NBO/T , Λ) и экспериментально установленными значениями Q_{exp}^n . В том случае, если эксперименты и расчеты были проведены правильно, то между указанными параметрами должна быть удовлетворительная корреляционная связь.

На рис. 2 показана взаимосвязь между Q_{exp}^n и NBO/T в системе CaO-SiO_2 (при температуре 1600°C). Из-за невозможности различить между собой ионы B^{3+} и B^{4+} в данном исследовании в корреляции между отношением NBO/T и Q_{exp}^n были использованы только 5 точек данных из бинарной системы CaO-SiO_2 . На рис. 3 показаны взаимосвязи между Q_{exp}^n и Λ в системах CaO-SiO_2 и CaO-

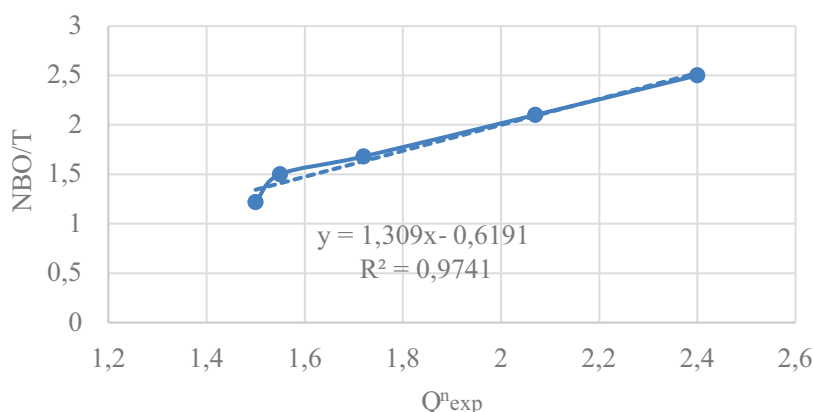
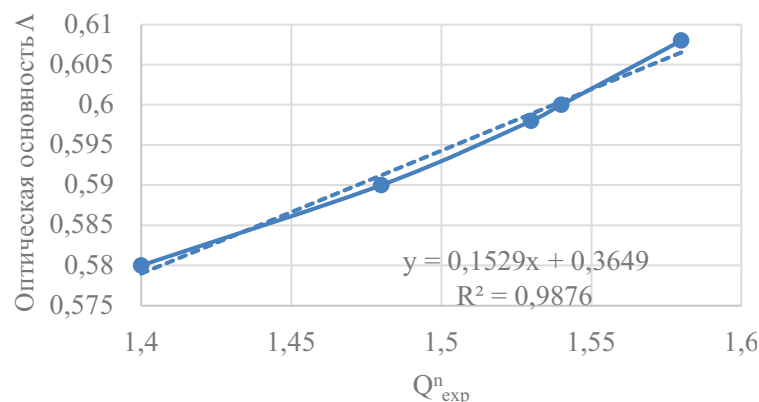
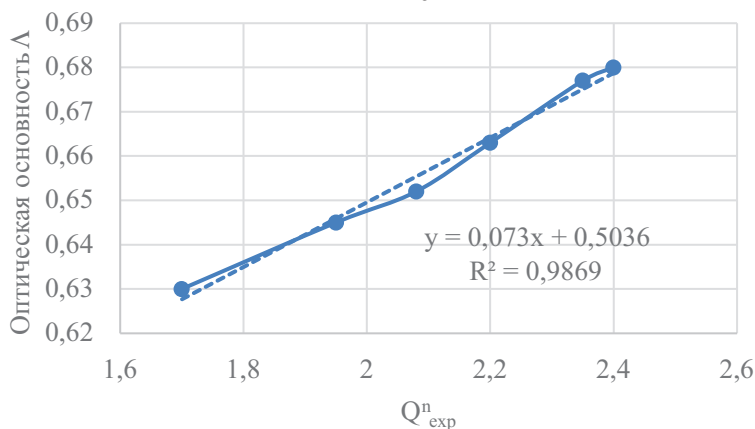


Рис. 2. Взаимосвязь между Q_{exp}^n и NBO/T в шлаковой системе CaO-SiO_2

Fig. 2. Relationship between Q_{exp}^n and NBO/T in CaO-SiO_2 slag system



a



b

Рис. 3. Взаимосвязь между Λ и Q_{exp}^n в шлаковых системах CaO-SiO_2 (a) и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ (b)

Fig. 3. Relationship between Λ and Q_{exp}^n in CaO-SiO_2 (a) and $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ (b) slag systems

SiO₂-B₂O₃. Коэффициент детерминации (R^2) для зависимости η от Q_{exp}^n составил 0,974, а для зависимости Λ от Q_{exp}^n – 0,9876 и 0,9869 для системы CaO-SiO₂ и CaO-SiO₂-B₂O₃ соответственно. Наличие в достаточной степени хорошего уровня корреляции между основными параметрами, описывающими структурный состав шлака, свидетельствует о том, что эксперименты и расчеты были проведены с достаточным уровнем точности, чтобы использовать полученные данные для последующего их использования в выявлении теоретических закономерностей, связывающих структуру шлака и его вязкость.

Вязкость для всех рассмотренных составов шлаков была рассчитана при 1600 °С с использованием моделей Урбена [21].

На рис. 4–5 представлены зависимости вязкости шлака, рассчитанной по двум вариантам модели Урбена, от Λ и Q_{exp}^n , соответственно, для изучаемых шлаковых систем. Красными линиями на обоих графиках представлены данные о шлаковых системах с добавкой оксида бора, синими линиями – шлаки без добавки оксида бора.

Для классического варианта расчета вязкости (кривые 1): значения R^2 для зависи-

мости вязкости от Λ составили 0,9996 (для двухкомпонентной системы) и 0,939 (для трехкомпонентной системы), см. рис. 4. Аппроксимирующие уравнения представляют собой степенные функции и третьего и четвертого порядка соответственно. Значения R^2 для зависимости вязкости шлаков от Q_{exp}^n составили 0,9557 (для двухкомпонентной системы) и 0,9611 (для трехкомпонентной системы), см. рис. 5. Аппроксимирующие уравнения представляют собой степенные функции второго и четвертого порядка.

Как видно из данных рис. 4, кривая 2 (взаимосвязь вязкости от Λ по модифицированному варианту модели Урбена), значения R^2 для зависимости вязкости составили 0,9986 (для двухкомпонентной системы) и 0,9936 (для трехкомпонентной системы). Аппроксимирующие уравнения в данном случае также представляют собой степенные функции третьего и четвертого порядка соответственно. R^2 для зависимости вязкости от Q_{exp}^n (см. рис. 5, кривая 2) – 0,9902 для двойной системы и 1 для тройной системы. Аппроксимирующие уравнения в данном случае также представляют собой степенные функции третьего и пятого порядка.

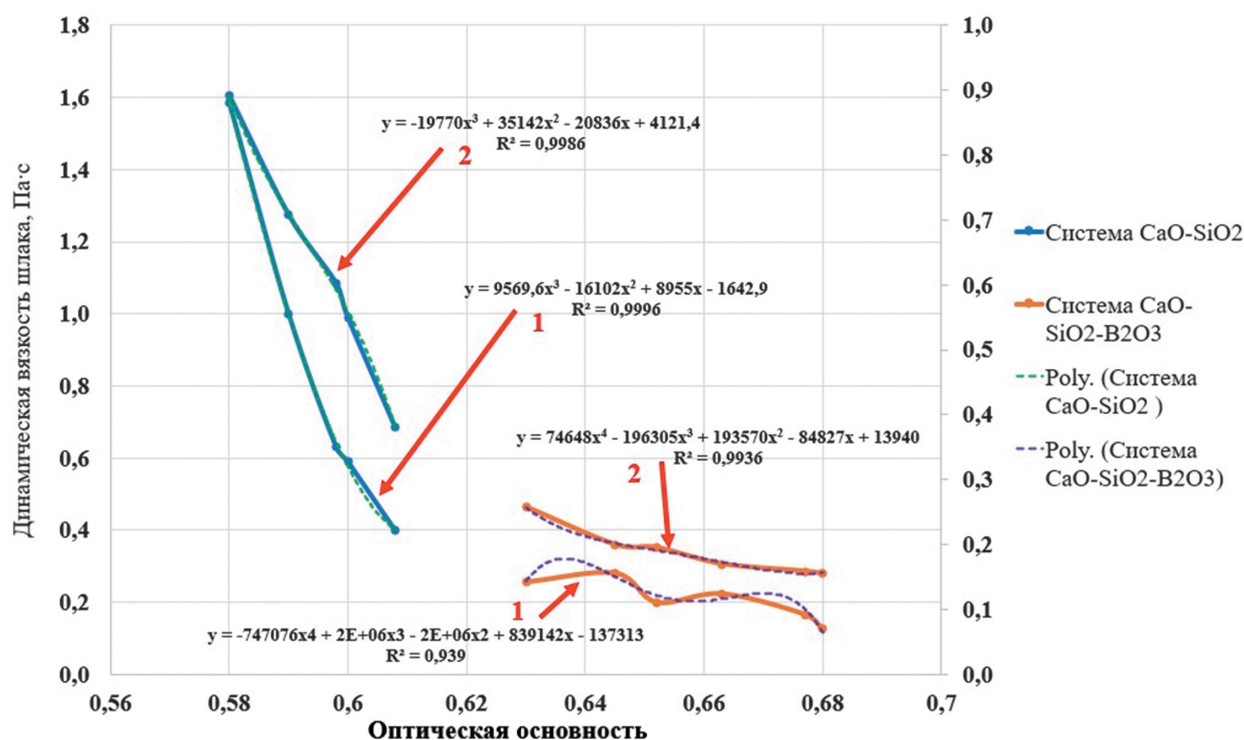


Рис. 4. Зависимость вязкости шлака от Λ изучаемых шлаковых систем, рассчитанной по вариантам модели Урбена: 1 – классическому; 2 – модифицированному

Fig. 4. Dependence of slag viscosity on the studied slag systems Λ calculated by Urbain model variants: 1 – classical variant; 2 – modified variant

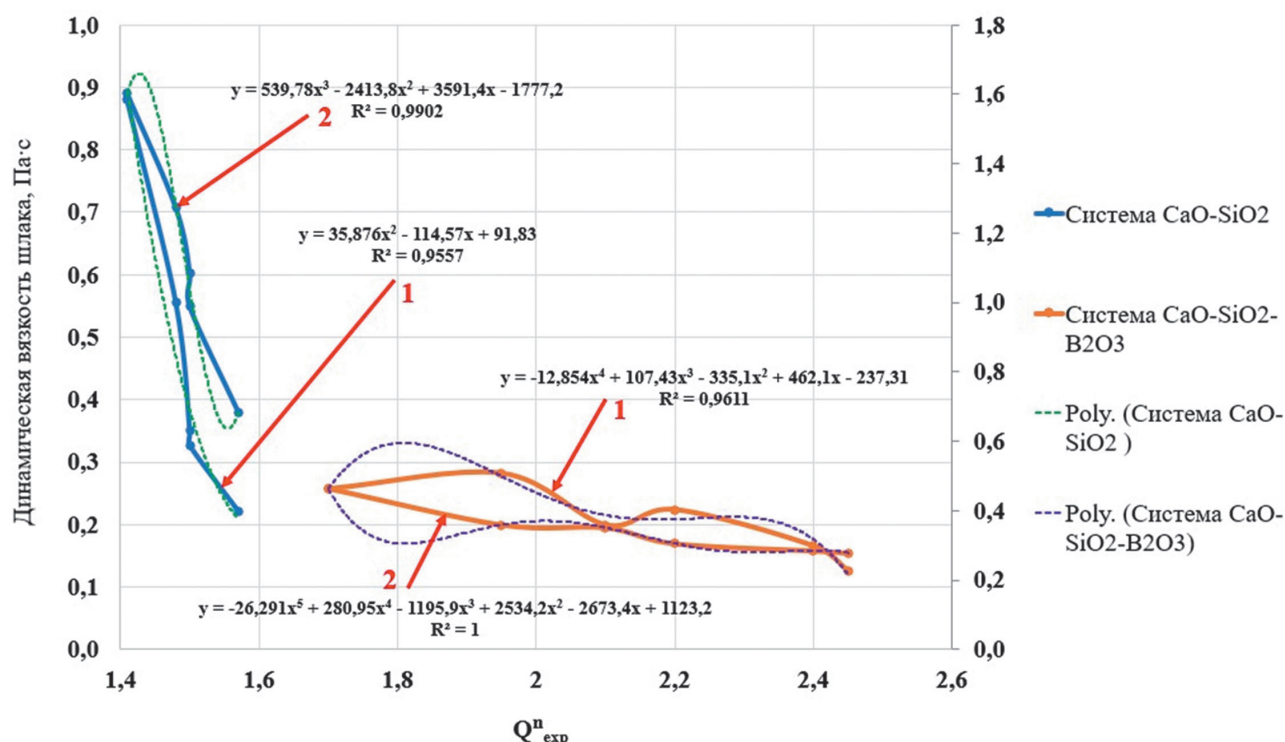


Рис. 5. Зависимость вязкости шлака от Q^n_{exp} изучаемых шлаковых систем, рассчитанной по вариантам модели Урбена: 1 – классическому; 2 – модифицированному

Fig. 5. Dependence of slag viscosity on the studied slag systems Q^n_{exp} calculated by the Urbain model variants: 1 – classical variant; 2 – modified variant

Допущение в модифицированном варианте модели Урбена о том, что В₂О₃ относится к кислотным оксидам, принципиально не повлияло на корреляцию между Λ и динамической вязкостью шлака.

В модели, разработанной Милсом и Сридхаром [19–21], также известной как

модель NPL, представлена идея связать вязкость и структурные модификации шлаков с использованием коррекций Λ для катионов, компенсирующих заряд. Графики зависимости между Λ , Q^n_{exp} и вязкостью шлаков, рассчитанные на основе данной модели, показаны на рис. 6 и 7.

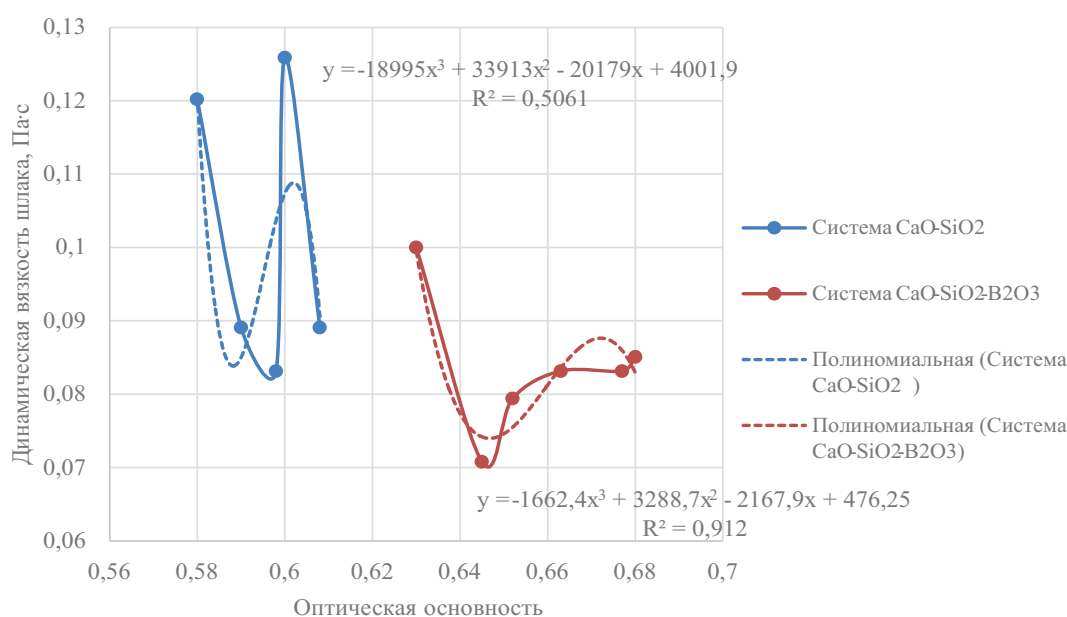


Рис. 6. Зависимость вязкости шлака, рассчитанной по модели Милса, от Λ изучаемых шлаковых систем

Fig. 6. Dependence of slag viscosity calculated by Mills model on Λ of the studied slag systems

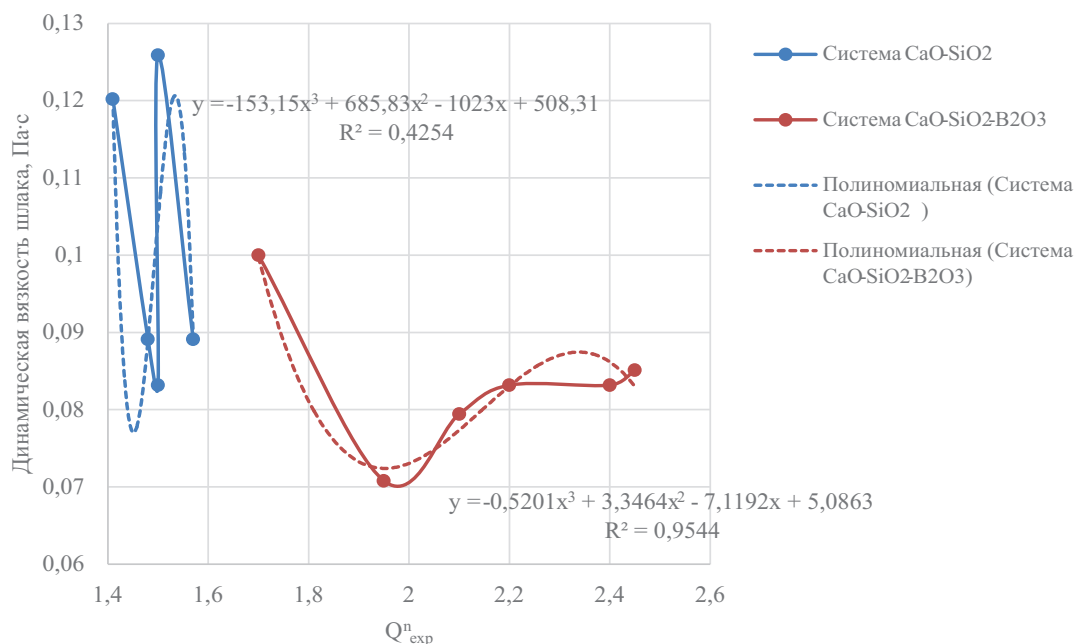


Рис. 7. Зависимость вязкости шлака, рассчитанной по модели Миллса, от Q^n_{exp} изучаемых шлаковых систем
Fig. 7. Dependence of slag viscosity calculated by Mills model on Q^n_{exp} of the studied slag systems

Значения R^2 для зависимости вязкости от Λ составили 0,5061 (для двухкомпонентной шлаковой системы) и 0,912 (для системы CaO-SiO₂-B₂O₃). R^2 для зависимости вязкости от Q^n_{exp} составили только 0,4254 для системы CaO-SiO₂ и 0,9544 для системы CaO-SiO₂-B₂O₃. Несмотря на то, что в обоих случаях аппроксимирующие уравнения – степенные функции высокого порядка, уровень корреляции очень низкий в области двухкомпонентной шлаковой системы. Из этого следует, что модель Миллса, в отличие от моделей Урбена, в меньшей степени подходит для оценки вязкости шлака по данным рамановской спектроскопии по составам шлака в областях диаграмм состояния, характерных для технологии выплавки металлургического кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из результатов проведенной исследовательской работы, динамическая вязкость шлака может быть оперативно определена на основе данных рамановской спектроскопии с применением математических моделей, связывающих вязкость и экспериментальную функцию деконволюции спектра Рамана шлаковых систем. Данная зависимость проявляет свойства фундаментальности, т.к. базируется на функции, наиболее точно описывающей особенности структуры шлака. Полученная зависимость пока-

зывает, что вязкость шлака снижается при увеличении числа мостиковых атомов кислорода в структуре силикатного аниона. При этом снижение вязкости шлака наблюдается до величины Q^n_{exp} , равной ~ 1,55–1,60 или Λ шлака 0,60–0,62. При добавлении оксида бора к двухкомпонентной системе динамическая вязкость также уменьшается, и с увеличением содержания оксида бора уменьшается, но незначительно. Однако для пирометаллургии кремния увеличение содержания бора в материалах, поступающих в процесс плавки, нежелательно, поэтому, несмотря на основность шлака, равную 1,22, и содержание бора 9,9%, вязкость имеет наименьшее значение (0,126 Па·с). С практической точки зрения (применительно для шлаков системы CaO-SiO₂) использование в качестве разжижающего агента борсодержащего флюса целесообразно при CaO/SiO₂ = 0,61–0,63, содержание оксида бора в составе шлака при этом необходимо поддерживать на уровне 1% (в наших модельных образцах 1,1–1,2%).

Показано, что для теоретического расчета вязкости в системах CaO-SiO₂, CaO-SiO₂-B₂O₃ более подходят два варианта модели, разработанной Урбеном. Разработанная Миллсом модель не подходит для этих целей, т.к. значения параметра корреляции в соответствующей математической модели для обеих шлаковых систем недостаточно велики.

Поскольку шлаковые системы синтезировались при температуре 1600 °С, необходимо продолжение работ в этом направлении в более широком температурном диапазоне с целью установления соответствующих зависимостей вязкости от Λ и Q_{exp}^n при различных температурах и их анализа.

По результатам проведенных теоретических исследований авторами были

проведены укрупненно-лабораторные испытания по выплавке кремния с добавкой борсодержащего флюса для устранения аварийной работы печи, связанной с ошлаковыванием подины. При этом особое внимание уделялось вопросу минимального перехода бора в кремний из флюса. Результаты данного этапа работы приведены в [28].

Список источников

1. Ракипов Д.Ф., Бардин Н.М., Жуков В.П. Физико-химические основы и технология переплава алюминиевого лома и сплавов в среде расплавленных хлоридов. Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2009. 194 с.
2. Popov I., Mitrofanov Y., Ustinov S.M. Feasibility of using aegirine concentrate as a complex flux in copper metallurgy // Metallurgist. 2012. Vol. 56. P. 64–70. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9537-4>.
3. Попов Д.А., Пентюхин С.И., Соснов В.О., Трапезников А.В. Флюсы для производства алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2016. № 5. С. 15–19. EDN: WMNMYB.
4. Abdeyazdan H., Edris H., Abbasi M.H. The effect of CaF_2 content in hot metal pretreatment flux based on lime // International Journal of Iron & Steel Society of Iran. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 5–8.
5. Жеребцов С.Н., Чернышов Е.А. Особенности физико-химических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1. С. 228–235. EDN: VZDVEZ.
6. Ким А.С., Акбердин А.А., Султангазиев Р.Б., Орлов А.С., Адамова Г.Х. Экспериментальные лабораторные исследования по разработке оптимальных технологических параметров выплавки борсодержащего силикохрома // Труды университета. Машиностроение. Металлургия. 2022. Т. 4. С. 72–79. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_72.
7. Жучков В.И., Заякин О.В., Акбердин А.А. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 7. С. 471–476. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>. EDN: AWOXRZ.
8. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
9. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Хоанг В.В., Жидков К.И. Шлаки кремниевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3>. EDN: ZNLKJP.
10. Ефимец А.М., Акбердин А.А., Ким А.С. Разработка и промышленное освоение технологии производства ферросилиция в руднотермических печах на борсодержащих шлаках // Труды Карагандинского государственного технического университета. 1999. Вып. 5. С. 65–68.
11. Ким А.С. Особенности выплавки ферросплавов с использованием боратовых руд // Сталь. 2008. № 8. С. 55–58. EDN: JUWNUZ.
12. Kline J., Tangstad M., Tranell G. A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica // Metallurgical and Materials Transactions B. 2015. Vol. 46. P. 62–73. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0194-9>.
13. Mills K.C. The influence of structure on the physico-chemical properties of slags // ISIJ International. 1993. Vol. 33. Iss. 1. P. 148–155. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.148>.
14. Mysen B., Richet P. Melt and glass structure: basic concepts // Silicate Glasses and Melts: Properties and Structure. Amsterdam: Elsevier, 2005. Vol. 10. Part 4. P. 101–130. [https://doi.org/10.1016/s0921-3198\(05\)x8001-2](https://doi.org/10.1016/s0921-3198(05)x8001-2).
15. Duffy J.A. A review of optical basicity and its applications to oxidic systems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. Vol. 57. Iss. 16. P. 3961–3970. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90346-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90346-X).
16. Duffy J.A., Ingram M.D. Establishment of an optical scale for Lewis basicity in inorganic oxyacids, molten salts, and glasses // Journal of American Chemical Society. 1971. Vol. 93. Iss. 24. P. 6448–6454. <https://doi.org/10.1021/ja00753a019>.
17. Urbain G., Cambier F., Deletter M., Anseau M.R. Viscosity of silicate melts // Transactions and Journal of British Ceramics Society. 1981. Vol. 80. No. 4. P. 139–141.
18. Urbain G. Viscosity estimation of slag // Steel Research. 1987. Vol. 58. Iss. 3. P. 111–116. <https://doi.org/10.1002/srin.198701513>.
19. Mills K.C., Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags // Ironmaking and Steelmaking. 1999. Vol. 26. Iss. 4. P. 262–268. <https://doi.org/10.1179/030192399677121>.
20. Mills K.C. Slag atlas / ed. V.D. Eisenhuttenleute. Dusseldorf: Verlag Sthleisen GmbH, 2008. P. 349–401.
21. Kekkonen M., Oghbasilasie H., Louhenkilpi S. Viscosity models for molten slags. Helsinki: Unigrafia Oy, 2012. 34 p.
22. Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ходосов И.Е., Ёлкин К.С. Исследование основных характеристик шлаков рафинирования кристаллического кремния // Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия. 2019: труды XXI Междунар. научно-практич. конф. (г. Новокузнецк, 23–24 ноября 2019 г.). Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. Ч. 1. С. 66–72.

23. Orlando A., Franceschini F., Muscas C., Pidkova S., Bartoli M., Rovere M., et al. A comprehensive review on Raman spectroscopy applications // *Chemosensors*. 2021. Vol. 9. Iss. 9. P. 262. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9090262>.
24. Kemmer G.C., Keller S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets // *Nature Protocols*. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 267–281. <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.182>.
25. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. Curve-fitting of Raman spectra of silicate glasses // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 686–695.
26. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. *Introductory Raman spectroscopy* // 2nd. ed. Elsevier, 2003. 434 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-254105-6.X5000-8>.
27. McMillan P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO–MgO–SiO₂ // *American Mineralogist*. 1984. Vol. 69. Iss. 7-8. P. 645–659.
28. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial SAF using borate fluxes // *Silicon*. 2024. Vol. 16. P. 3085–3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>.

References

1. Rakipov D.F., Bardin N.M., Zhukov V.P. *Physicochemical foundations and technology of remelting aluminum scrap and alloys in a molten chloride environment*. Ekaterinburg: IzdatNaukaServis; 2009, 194 p. (In Russ.).
2. Popov I., Mitrofanov Y., Ustinov S.M. Feasibility of using aegirine concentrate as a complex flux in copper metallurgy. *Metallurgist*. 2012;56:64-70. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9537-4>.
3. Popov D.A., Pentyuhin S.I., Sosnov V.O., Trapeznikov A.V. Fluxes for the production of aluminum alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2016;5:15-19. (In Russ.). EDN: WMNMYB.
4. Abdeyazdan H., Edris H., Abbasi M.H. The effect of CaF₂ content in hot metal pretreatment flux based on lime. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2011;8(2):5-8.
5. Zherebtsov S.N., Chernyshov E.A. Features of the physicochemical properties of fluxes used in electros slag remelting technologies. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2016;1:228-235. (In Russ.). EDN: VZDVEZ.
6. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziev R.B., Orlov A.S., Adamova G.H. Experimental laboratory studies on the development of optimal technological parameters for the smelting of boron-containing silicochrome. *Trudy universiteta. Mashinostroyeniye. Metallurgiya*. 2022;4:72-79. (In Russ.). https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_72.
7. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(7):471-476. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>. (In Russ.). EDN: AWQXRZ.
8. Gasik M.I., Gasik M.M. *Electrothermy of silicon*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p. (In Russ.).
9. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Hoang V.V., Zhidkov K.I. Silicon production slags. *International Research Journal*. 2022;11. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3>. EDN: ZNLKJP.
10. Efimets A.M., Akberdin A.A., Kim A.S. Development and industrial implementation of ferrosilicon production technology in ore-smelting furnaces using boron-containing slag. *Trudy universiteta Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 1999;5:65-68. (In Russ.). EDN: JUWNUZ.
11. Kim A.S. Smelting ferroalloys by means of borate ores. *Stal'*. 2008;8:55-58. (In Russ.). EDN: JUWNUZ.
12. Kline J., Tangstad M., Tranell G. A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015;46:62-73. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0194-9>.
13. Mills K.C. The influence of structure on the physico-chemical properties of slags. *ISIJ International*. 1993;33(1):148-155. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.148>.
14. Mysen B., Richet P. Melt and glass structure: basic concepts. In: *Silicate Glasses and Melts: Properties and Structure*. Amsterdam: Elsevier; 2005, vol. 10, part 4, p. 101-130. [https://doi.org/10.1016/s0921-3198\(05\)x8001-2](https://doi.org/10.1016/s0921-3198(05)x8001-2).
15. Duffy J.A. A review of optical basicity and its applications to oxidic systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993;57(16):3961-3970. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90346-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90346-X).
16. Duffy J.A., Ingram M.D. Establishment of an optical scale for Lewis basicity in inorganic oxyacids, molten salts, and glasses. *Journal of American Chemical Society*. 1971;93(24):6448-6454. <https://doi.org/10.1021/ja00753a019>.
17. Urbain G., Cambier F., Deletter M., Anseau M.R. Viscosity of silicate melts. *Transactions and Journal of British Ceramics Society*. 1981;80(4):139-141.
18. Urbain G. Viscosity estimation of slag. *Steel Research*. 1987;58(3):111-116. <https://doi.org/10.1002/srin.198701513>.
19. Mills K.C., Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags. *Ironmaking and Steelmaking*. 1999;26(4):262-268. <https://doi.org/10.1179/030192399677121>.
20. Mills K.C. *Slag atlas* / ed. V.D. Eisenhuttenleute. Dusseldorf: Verlag Sthleisen GmbH; 2008, p. 349-401.
21. Kekkonen M., Oghbasilasie H., Louhenkilpi S. *Viscosity models for molten slags*. Helsinki: Unigrafia Oy; 2012, 34 p.
22. Rozhihina I.D., Nohrina O.I., Hodosov I.E., Yolkin K.S. Study of the main characteristics of crystalline silicon refining slags. *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya*. 2019: trudy XXI Mezhdunarodnoj

nauchno-prakticheskoy konferencii = *Metallurgy: technologies, innovations, quality*. 23–24 November 2019, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2019, Part. 1, p. 66-72. (In Russ.).

23. Orlando A., Franceschini F., Muscas C., Pidkova S., Bartoli M., Rovere M., et al. A comprehensive review on Raman spectroscopy applications. *Chemosensors*. 2021;9(9):262. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9090262>.

24. Kemmer G.C., Keller S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets. *Nature Protocols*. 2010;5(2):267-281. <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.182>.

25. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. Curve-fitting of Raman spectra of silicate glasses. *American Mineralogist*. 1982;67:686-695.

26. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. *Introductory Raman spectroscopy*. Elsevier; 2003, 434 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-254105-6.X5000-8>.

27. McMillan P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO–MgO–SiO₂. *American Mineralogist*. 1984;69(7-8):645-659.

28. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial SAF using borate fluxes. *Silicon*. 2024;16:3085-3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Ильин Александр Александрович,

научный сотрудник,
Карагандинский индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30,
Республика Казахстан
worldilyins@gmail.com
<http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

Тютрин Андрей Александрович

к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
an.tu@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Галачиева Светлана Владимировна

д.э.н., профессор,
первый проректор,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия
svetagalachieva@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7193-0454>

Яковлева Ариадна Алексеевна,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры химии
и биотехнологии им. проф. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
ayakovistu@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Alexander A. Ilin,

Researcher,
Karaganda Industrial University,
30, Respubliki pr., Temirtau 101400,
Republic of Kazakhstan,
worldilyins@gmail.com
<http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

Andrey A. Tyutrin

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
an.tu@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Svetlana V. Galachieva,

Dr. Sci. (Econ.), Professor,
First Vice-Rector,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz 362021, Russia
svetagalachieva@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7193-0454>

Ariadna A. Yakovleva,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology
named after Professor V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
ayakovistu@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Заявленный вклад авторов

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями. Ильин А.А. провел эксперименты, обобщил полученные результаты. Тютрин А.А. сделал выводы по результатам исследований, осуществил графическую интерпретацию результатов исследований. Галачиева С.В. осуществляла консультационное сопровождение экспериментальных работ. Яковлева А.А. проводила подбор литературных источников по тематике и общее редактирование текста рукописи.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.08.2024 г.; принята к публикации 10.09.2024 г.

Authors' contribution

Nina V. Nemchinova carried out scientific supervision of the research. Alexander A. Ilin conducted experiments and summarized the obtained results. Andrey A. Tyutrin derived conclusions based on the research results as well as diagrammed the research results. Svetlana V. Galachieva provided consultative support for the experimental work. Ariadna A. Yakovleva selected literary sources on the research topic and generally edited the manuscript.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors..

Information about the article

The article was submitted 25.06.2024; approved after reviewing 10.08.2024; accepted for publication 10.09.2024.