



Оригинальная статья

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-399-405

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2320>

ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ НИОБИЕВЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

О. В. Заякин, Р. Р. Шартдинов, А. Н. Сметанников, И. Н. Кель

■ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Показана актуальность разработки современных технологических решений по переработке используемых для производства комплексных ферросплавов ниобиевых рудных материалов отечественных месторождений. Необходимость разработки новых технологических процессов переработки вызвана тем, что при переходе на новые виды ниобиевых концентратов изменяются химический и фазовый составы исходных материалов, а, следовательно, это приводит к изменению состава и свойств продуктов плавки (как металлических, так и оксидных). При помощи электровибрационного вискозиметра изучены температурные зависимости вязкости и рассчитаны температуры кристаллизации оксидных расплавов системы $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$. Составы исследуемых образцов соответствуют бесфосфористым ниобиевым шлакам, получение которых возможно карботермическим методом из черновых концентратов. Образцы получены методом сплавления оксидных материалов в высокотемпературной лабораторной электропечи. На основе полученных данных построены графические зависимости вязкость – температура. Экспериментально установлено, что оксидные расплавы, содержащие 15 – 26 % Nb_2O_5 , по характерной зависимости вязкость – температура являются более «длинными» (имеющими широкий диапазон кристаллизации) и неблагоприятными. Повышение концентрации пентаоксида ниобия до 40 % переводит шлаки в разряд «коротких» (с высокой скоростью кристаллизации). Показано, что повышение концентрации оксида ниобия Nb_2O_5 от 15 до 40 % приводит к снижению температуры кристаллизации расплавов на 200 °С и уменьшению вязкости расплавов с 1,32 до 0,24 Па·с при 1350 °С. Улучшение физико-химических характеристик оксидных расплавов при повышении концентрации пентаоксида ниобия может благоприятно отразиться на технико-экономических показателях производства ферросплавов.

Ключевые слова: металлургия, оксидный расплав, температура кристаллизации, вязкость, физико-химические характеристики, ферросплав

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00252.

Для цитирования: Заякин О.В., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н., Кель И.Н. Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 399–405.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-399-405>

Original article

VISCOSITY OF NIOBIUM OXIDE SYSTEMS FOR PRODUCTION OF COMPLEX FERROALLOYS

O. V. Zayakin, R. R. Shartdinov, A. N. Smetannikov, I. N. Kel'

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

Abstract. The relevance of the development of modern technological solutions for the processing of niobium ore materials used for the production of complex ferroalloys of domestic deposits is shown. The need to develop new technological processes of processing is caused by the fact that when switching to new types of niobium concentrates, the chemical and phase compositions of the starting materials change, and, consequently, this leads to a change in the composition and properties of the melting products (both metallic and oxide). Using an electrovibration viscometer, the temperature dependences of viscosity were studied and the crystallization temperatures of oxide melts of the $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ system were calculated. The compositions of the studied samples correspond to phosphorless niobium slags, which can be obtained by carbothermic method from rough concentrates. The samples were obtained by fusing oxide materials in a high-temperature laboratory electric furnace. On the basis of the obtained data, graphical dependences of viscosity – temperature are constructed. It was experimentally established that oxide melts containing 15 – 26 % Nb_2O_5 are more “long” (having a wide crystallization range) and unfavorable according to the characteristic viscosity – temperature dependence. An increase in the concentration of niobium pentoxide to 40 % translates slags into the category of “short” (with a high crystallization rate). It is shown that an increase in the concentration of niobium oxide Nb_2O_5 from 15 to 40 % leads to a decrease in the crystallization temperature of melts by 200 °C and a decrease in the viscosity of melts from 1.32 to 0.24 Pa·s at 1350 °C. The improvement of the physico-chemical characteristics of oxide melts with an increase in the concentration of niobium pentoxide can favorably affect the technical and economic indicators of ferroalloy production.

Keywords: metallurgy, oxide melt, niobium, crystallization temperature, viscosity, physicochemical characteristics, ferroalloy

Funding: The research was supported by the grant No. 21-19-00252 of the Russian Science Foundation.

For citation: Zayakin O.V., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N., Kel' I.N. Viscosity of niobium oxide systems for production of complex ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 399–405. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-399-405>

ВВЕДЕНИЕ

Около 90 % ниобия потребляется сталеплавильной промышленностью в виде ферросплава (феррониобий, 60 – 65 % Nb). В настоящее время Россия по уровню производства и потребления ниобия отстает от многих стран с развитой экономикой. Феррониобий является остродефицитным товаром, потребности в котором удовлетворяются за счет импорта (как в виде феррониобия, так и в виде трубной и иной ниобийсодержащей продукции). В качестве легирующей добавки ниобий заменяет более дорогие элементы [1]. В настоящее время основными факторами, определяющими рынок ниобия, являются увеличение его потребления в сталях конструкционных марок и широкое использование сплавов на основе ниобия в производстве авиационных двигателей¹ [2].

Мировой рынок ниобиевых продуктов, выросший за последние 25 лет в 4,3 раза, характеризуется абсолютным доминированием бразильской компании «Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração» (CBMM), которая осуществляет 86 % мирового производства накопленного ниобиевого сырья. Разработка крупнейшего в мире месторождения ниобия Араша с высококачественными и технологичными пироксоровыми рудами (среднее содержание Nb₂O₅ 2,5 %) и отлаженное производство с добычей до 54 тыс. т Nb₂O₅/год позволяют CBMM удерживать монопольную позицию, препятствуя выходу на рынок ниобия новых участников [3 – 5].

В России практически все производство ниобия и тантала базируется на лопаритовых рудах Лавозёрского месторождения, характеризующихся низкими содержаниями ниобия и тантала в рудах (0,24 % Nb₂O₅, 0,014 % Ta₂O₅) и концентратах (около 8 % и 0,8 – 1,5 % соответственно), неблагоприятными горно-геологическими условиями отработки (подземная добыча). Получаемые из лопаритовых концентратов на «Соликамском магниевом заводе» методом хлорирования технический пентаоксид и гидроксид ниобия (около 500 т в год) используются для производства феррониобия стандартных марок на «Ключевском заводе ферросплавов» и (частично) направляются в Казахстан на «Ульбинский металлургический завод» (г. Усть-Каменогорск). Возобновлены поставки гидроксида ниобия в Эстонию (г. Силлимяэ), где из него производят феррониобий

и сплавы Nb–Ni. Попытка ЗАО «Стальмаг» вовлечь в промышленное освоение Татарское месторождение (Красноярский край) (0,6 % Nb₂O₅ в апатит-пироксоровых рудах коры выветривания карбонатитов) оказалась неудачной из-за низких показателей извлечения пироксорола в концентраты, необходимости их кондиционирования (обесфосфоривания). В связи с этим в 2011 г. работы на этом месторождении были прекращены.

Российские источники ниобиевого сырья характеризуются существенными минерально-технологическими отличиями от импортных руд и друг от друга. По данным работы [6] перспективные промышленные источники этого сырья можно разделить на три группы:

- объекты ускоренного освоения: Татарское месторождение (Красноярский край), представлено промышленными минералами: пироксорол, апатит и вермикулит; Салланлатва (Мурманская обл.), минералы: луешит, барит;

- объекты комплексного промышленного освоения с попутным пироксоролом: Катугинское месторождение (Читинская область), минералы: гагаринит, пироксорол, колумбит, циркон, криолит;

- объекты суперкрупные и крупные с ведущей пироксоровой специализацией и природнолегируемыми рудами: месторождения Томторское (Саха-Якутия) (пироксорол, монацит, крадаллит и др.); Большетангинское (Иркутская обл.) (пироксорол, апатит); Белозиминское (Иркутская обл.) (пироксорол, апатит, колумбит, монацит).

Концентрация Nb₂O₅ в отечественных рудах колеблется в пределах от 0,1 до 1 %, также в них содержатся в различных количествах фосфор, торий и другие элементы. При обогащении руд этих месторождений получают концентраты разного состава, содержащие от 15 – 25 до 40 – 50 % Nb₂O₅, до 10 – 15 % оксида фосфора.

В связи с этим возникают задачи по разработке для каждого вида рудного сырья эффективных процессов получения ниобиевых ферросплавов приемлемого для сталеплавильщиков состава.

По данным работы [1] основные промышленные и потенциально-промышленные типы месторождений ниобия в России характеризуются высоким содержанием фосфора. Использование такого сырья при получении кондиционных концентратов для производства феррониобия вызывает необходимость применения сложных многостадийных процессов обогащения. В связи с этим становится нерентабельным, а в ряде случаев невозможным получение стандартных марок феррониобия по существующим технологическим схемам. В России продолжаются работы по оценке запа-

¹ Biesheuvel T., Riseborough J. The commodity that no one knows about but everybody wants to buy. Bloomberg, 2020. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-05-17/the-commodity-that-no-one-knows-about-but-everybody-wants-to-buy> (Дата обращения 21.10.2021)

сов, отработке технологий, технико-экономической оценке и ранжированию освоения отдельных участков и месторождений в целом [7, 8].

Химическая технология переработки ниобиевых концентратов сопряжена с рядом особенностей, обусловленных низким содержанием ниобия в рудах, сложным составом минералов и руд, тонкой вкрапленностью и рассеянностью. Это обуславливает выбор сложных технологических схем при переработке рудных концентратов.

При переходе на новые виды ниобиевых концентратов изменяются химический и фазовый составы исходных материалов, а, следовательно, и условия протекания восстановительных процессов, что приводит к изменению состава и свойств продуктов плавки (как металлических, так и оксидных) [9–11]. Образуется шлак нового состава, который обладает другими физико-химическими характеристиками. Изучение характеристик ниобийсодержащих оксидных систем проведено в ряде работ [12–16], однако имеющихся в литературе данных недостаточно для глубокого понимания зависимости физико-химических характеристик от химического и фазового составов оксидных расплавов, образующихся при переработке черновых ниобиевых концентратов. К сожалению, отсутствие широкомасштабных исследований свойств образующихся оксидных расплавов зачастую не позволяет поддерживать рациональный шлаковый режим плавки, что приводит к уменьшению степени извлечения основных компонентов и снижению технико-экономических показателей производства новых ферросплавов [17]. В связи с этим для разработки эффективного способа переработки отечественных ниобиевых рудных материалов необходимо изучение состава и физико-химических характеристик оксидных расплавов, которые образуются при карботермическом процессе получения бесфосфористых ниобиевых шлаков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В лабораторных условиях синтетическим методом получены образцы оксидных материалов системы $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$. Химический состав опытных образцов представлен в таблице.

Изучено влияние концентрации Nb_2O_5 на вязкость и температуру кристаллизации шлаков. Вязкость является

одним из основных параметров, характеризующих физические свойства оксидных расплавов [18]. Вязкость жидкости определяется межчастичным взаимодействием, поэтому ее изучение (наряду с другими физико-химическими свойствами [19, 20]) позволяет оценить строение шлаковых расплавов и их природу. Вязкость шлаков и металлов в значительной мере определяет скорость различных физико-химических процессов и особенно диффузионных явлений в расплавах [21]. В ряде случаев вязкость шлака определяет работоспособность металлургических агрегатов, в частности, обуславливает такие явления, как взаимодействие шлака с огнеупорами, потери металла со шлаком и др.

В настоящей работе вязкость образцов шлака измеряли на электровибрационном вискозиметре в молибденовых тиглях в токе аргона. Высокая чувствительность вибрационного вискозиметра обусловлена тем, что он работает на резонансных колебаниях, а вязкость расплава нарушает условия резонанса [22, 23].

Для фиксирования изменения напряжения (вязкости расплава) использовали цифровой вольтметр, включенный параллельно измерительной катушке. Его показания пропорциональны амплитуде и частоте колебаний измерительной катушки. Исследования проводили при непрерывном охлаждении расплава со скоростью 1–3 °C/мин. до полной кристаллизации или достижения значений вязкости 9–10 Па·с в зависимости от кристаллизационной способности шлака.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость вязкости (η) оксидных расплавов системы $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ от температуры (T) и концентрации Nb_2O_5 представлена на рис. 1 (номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице).

Кривая для образца 3 (рис. 1) представляет наиболее «короткий» шлак, который быстро кристаллизуется. Рентгенофазовые исследования, выполненные на оборудовании ЦКП Урал-М, показали присутствие в образце 3 большого количества аморфной фазы, затрудняющей изучение его фазового состава.

Изучение фазового состава рентгеноспектральным способом не позволило определить присутствующие в нем фазы, поэтому выполнен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) и изучены фазовые диаграммы

Химический состав и температура кристаллизации ниобийсодержащих образцов

Chemical composition and crystallization temperature of niobium-containing samples

Образец	Содержание, % (по массе)					Основность	Температура кристаллизации, °C
	SiO_2	CaO	Nb_2O_5	TiO_2	Al_2O_3		
1	34,33	40,72	15,39	5,24	4,32	1,19	1260
2	29,39	36,78	25,75	4,66	3,42	1,25	1190
3	23,55	29,78	40,15	3,60	2,92	1,26	1060

мы состояния системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Nb}_2\text{O}_5$. Обнаружено присутствие ниобатов кальция ($\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$, CaNb_2O_6 , $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$), псевдоволластонита (CaSiO_3) и оксида кремния, что коррелирует с литературными данными [14, 16]. Присутствующие в образце оксиды TiO_2 и Al_2O_3 являются амфотерными. Согласно литературным данным [24, 25], они имеют разнонаправленное действие, которое нивелируется из-за их близкой концентрации.

Образец 3 при перегреве выше 1250°C характеризуется вязкостью $0,2-0,3$ Па·с, но после достижения температуры ликвидуса (1060°C) резко загущается.

Таким образом можно сделать вывод о том, что шлак с повышенным содержанием пентаоксида ниобия имеет узкий диапазон кристаллизации и относится к разряду «коротких» шлаков.

Снижение концентрации ниобия в исследуемых образцах переводит их в разряд «длинных», то есть шлаки с широким интервалом кристаллизации. Они более вязкие и, не кристаллизуясь, застывают в стекло (рис. 1, кривые 1 и 2) [26]. В связи с этим характер кривых $\eta-T$ для шлаков 1 и 2 более плавный, а для образца 3 участок перегиба выражен четче. У образцов 1 и 2 при охлаждении вязкость повышается медленно. В шлаке 1 присутствует тугоплавкое соединение $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$, чем и объясняется более высокая температура кристаллизации и характер кривой зависимости вязкости от температуры.

С точки зрения практики ферросплавного производства наиболее благоприятны «короткие» шлаки, которые должны обладать свойствами быстрого снижения вязкости при достижении определенных температур, что исключает образование пластичного состояния вещества, затрудняющего перемещение газов и растягивающего зону шлакообразования по высоте печи.

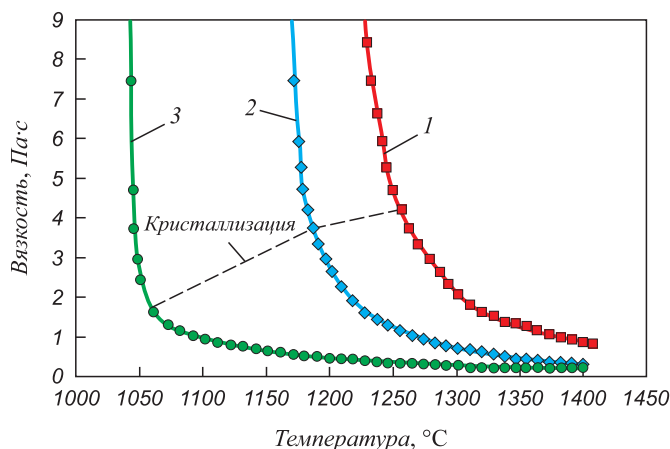


Рис. 1. Зависимость вязкости оксидных расплавов системы $\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ от температуры и концентрации Nb_2O_5

Fig. 1. Dependence of viscosity of oxide melts of $\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ system on temperature and Nb_2O_5 concentration

Образцы шлаков 1 и 2 возможно перевести в разряд «коротких», например, за счет увеличения их основности добавками извести. Однако добавки CaO приведут к значительному увеличению количества шлака. Необходимо заметить, что при использовании образцов 1 и 2 с пониженной концентрацией базового компонента (Nb_2O_5) кратность шлака становится существенно выше, чем у образца 3. Поэтому даже небольшое повышение основности приведет к резкому увеличению количества шлака. На практике стремятся получить минимальное количество шлака, так как увеличение его кратности приводит к росту расхода электроэнергии и продолжительности плавки.

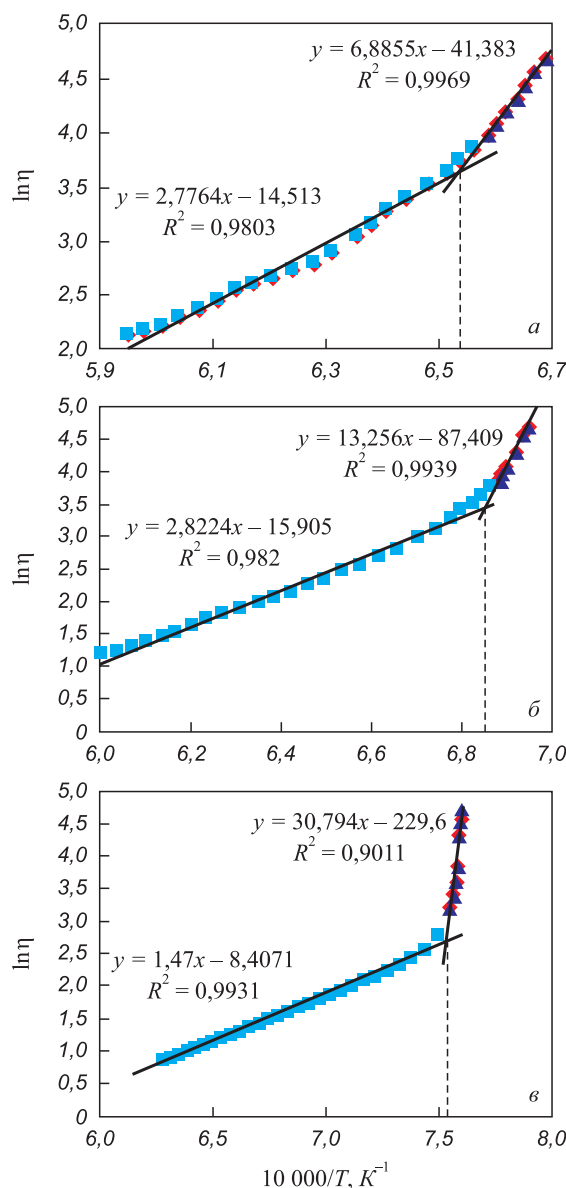


Рис. 2. Зависимость $\ln \eta$ оксидных расплавов системы $\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ от T^{-1} и концентрации Nb_2O_5 образцов 1–3 (а–в)

Fig. 2. Dependence of $\ln \eta$ of oxide melts of $\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ system on T^{-1} and Nb_2O_5 concentration of the samples 1–3 (a–в)

В связи с более или менее резким изменением свойств системы при пересечении линии ликвидуса в процессе охлаждения (в том числе и изменения вязкости) существует возможность определения температуры кристаллизации шлака по характеру перелома кривых в координатах $\lg \eta - T^{-1}$ (рис. 2). Данному перелому соответствует температура начала кристаллизации. Методика определения температуры кристаллизации подробно описана в работе [23]. Основанием для такого заключения являются обнаруженные экспериментально и выведенные на основе молекулярно-кинетических теорий уравнения, связывающие вязкость жидкостей с их температурой [26]. Зависимости $\lg \eta$ изучаемых оксидных расплавов от T^{-1} с определением точек перелома линий представлены на рис. 2. Температуры кристаллизации изучаемых шлаков представлены в таблице.

При производстве ферросплавов температура кристаллизации шлака имеет большое значение, в рудно-термических печах она определяет температуру процесса. Температура кристаллизации не должна быть слишком высокой, чтобы не происходило перерасхода электроэнергии на нагрев и плавление тугоплавкого шлака, а также излишнего расхода огнеупорных материалов.

Вязкость шлаков оказывает большое влияние на распределение элементов между металлической и шлаковой фазами. Низкая вязкость шлаков необходима для полной коагуляции металлических частиц в сплаве.

В густых оксидных расплавах скорость оседания мелких королек металла слишком мала, что приводит к нежелательным потерям металла со шлаком. Это особенно актуально при выплавке малофосфористого ниобиевого шлака из-за его высокой кратности. Высокая вязкость шлаков также может приводить к образованию гарнисажа, сокращению рабочего пространства печи, вызывать трудности вскрытия леток и удаления продуктов плавки. Повышение концентрации оксида Nb_2O_5 в шлаках при прочих равных условиях приводит к существенному снижению вязкости расплавов. Шлак 3 обладает наименьшей вязкостью (0,24 Па·с при 1350 °С) по сравнению с остальными изученными шлаками.

Выводы

Исследованы вязкость и температура кристаллизации оксидных расплавов системы $Nb_2O_5-SiO_2-CaO-TiO_2-Al_2O_3$. Повышение концентрации оксида Nb_2O_5 от 15 до 40 % приводит к снижению температуры кристаллизации расплавов на 200 °С, к переходу шлаков из разряда «длинных» в «короткие», к снижению вязкости расплавов с 1,32 до 0,24 Па·с при 1350 °С.

Улучшение физико-химических характеристик оксидных расплавов при повышении концентрации пентаоксида ниобия может благоприятно отразиться на технико-экономических показателях производства ферросплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусова Е.Б., Пикалова В.С., Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4-5. С. 8–15.
2. Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Часть 2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
3. Боярко Г.Ю. Динамика мирового производства и товарных потоков ниобиевого сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 216–229. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2318>
4. Paraiso-Fo O.D.S., Fuccio R., Betz E.W. Mining, ore preparation and niobium based materials production at Araxa, Brazil // High Temperature Materials and Processes. 1993. Vol. 11. No. 1-4. P. 119–138.
5. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine. Niobium, Science and Technology // Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States. 2001. Code 62351. P. 29–35.
6. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России. В кн.: Труды конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. Екатеринбург: ООО изд. «АльфаПринт», 2018. С. 36–45.
7. Стулов П.Е., Серегин А.Н., Пикалова В.С. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобийсодержащих сплавов из концентратов руд Большетажинского месторождения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 4. С. 5–11.
1. Nechaev A.V., Polyakov E.G., Belousova E.B., Pikalova V.S., Bykhovskii L.Z. Mineral resource base of niobium in Russia: Development priorities. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2020, no. 4-5, pp. 8–15. (In Russ.).
2. Nikishina E.E., Drobot D.V., Lebedeva E.N. Niobium and tantalum: State of the world market, application fields, and sources of raw materials. Part 2. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 130–140. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020126>
3. Boyarko G.Yu. Dynamics of global production and commodity flows of niobium raw materials. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019, vol. 330, no. 10, pp. 216–229. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2318>
4. Paraiso-Fo O.D.S., Fuccio R., Betz E.W. Mining, ore preparation and niobium based materials production at Araxa, Brazil. *High Temperature Materials and Processes*. 1993, vol. 11, no. 1-4, pp. 119–138.
5. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine. Niobium, Science and Technology. In: *Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States*. 2001, code 62351, pp. 29–35.
6. Melent'ev G.B. Prospects for providing own rare metal raw materials and development of ferroniobium production in Russia. In: *Proceedings of the Conf. "Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering"*. FERRO-ALLOYS. Yekaterinburg: Al'faPrint, 2018, pp. 36–45. (In Russ.).
7. Stulov P.E., Seregin A.N., Pikalova V.S. Development of technology for smelting ferroniobium and niobium-containing alloys from ore concentrates of the Bolshetagninsky deposit. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2012, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.).

8. Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Болшегагинского месторождения. Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 2017. 18 с.
9. Zhuckov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Obtaining of niobium-containing ferroalloys from the Russian ore raw materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. Article 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
10. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production // *Metalurgiya*. 2019. Vol. 58. No. 3-4. P. 291–294.
11. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome // *Metalurgiya*. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529–532.
12. Ma Zh., Zhao Z., Guo W., Wang Zh. Influence of Nb₂O₅ and basicity on the viscosity and structure of CaO–SiO₂–Nb₂O₅–CeO₂–CaF₂ slag system // *Metallurgical Research and Technology*. 2020. Vol. 117. No. 3. Article 307. <https://doi.org/10.1051/metal/2020023>
13. Истомин С.А., Красиков С.А., Пастухов Э.А., Рябов В.В. Влияние ниобийсодержащих добавок на вязкость и электропроводность оксидно-фторидных расплавов // *Металлы*. 2006. № 2. С. 44–49.
14. Ibrahim M., Bright Norman F.H. The binary system Nb₂O₅ – SiO₂ // *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 45. No. 5. P. 221–222. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11130.x>
15. Ibrahim M., Bright Norman F.H., Rowland J.F. The binary system CaO – Nb₂O₅ // *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 45. No. 7. P. 329–334. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11161.x>
16. Liu C., Qiu J., Sun L. Liquidus and phase equilibrium in CaO–SiO₂–Nb₂O₅–10 % La₂O₃ system // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 4. P. 612–619. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-569>
17. Ким А.С., Заякин О.В., Акбердин А.А., Концевой Ю.В. Получение и применение новых комплексных борсодержащих ферросплавов // *Электрометаллургия*. 2009. № 12. С. 21–24.
18. Sariev O., Kim S., Zhumagaliyev Y., Kelamanov B., Sultanov M., Nurgali N. Viscosity and crystallization temperature of ferroalloy slags from Kazakhstan ore // *Metalurgiya*. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 525–528.
19. Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И., Есенжулов А.Б., Островский Я.И. Основные направления переработки бедного отечественного хромородного сырья // *Электрометаллургия*. 2008. № 5. С. 18–21.
20. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007. № 5. С. 13–16.
21. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников, Л.А. Пронин. М.: Металлургия, 1988. 511 с.
22. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Боцегов В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // *Заводская лаборатория*. 1985. Т. 51. № 9. С. 56–57.
23. Акбердин А.А. Избранные труды. Караганда: ПК «Экожан», 2008. 754 с.
24. Park H., Park J.-Y., Kim G.H., Sohn I. Effect of TiO₂ on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags // *Steel Research International*. 2012. Vol. 83. No. 2. P. 150–156. <https://doi.org/10.1002/srin.201100249>
25. Kim Y., Min D.-J. Viscosity and structural investigation of high-concentration Al₂O₃ and MgO slag system for FeO reduction in electric arc furnace processing // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 1169. <https://doi.org/10.3390/met11081169>
26. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевиц А.Г. Свойства жидких доменных шлаков. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
8. Pikalova V.S. *Geological and economic assessment of a new potentially industrial type of niobium ores on the example of the Bolshegaigin deposit: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Moscow, 2017, 18 p. (In Russ.).
9. Zhuckov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Obtaining of niobium-containing ferroalloys from the Russian ore raw materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 966, article 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
10. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production. *Metalurgiya*. 2019, vol. 58, no. 3-4, pp. 291–294.
11. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metalurgiya*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 529–532.
12. Ma Zh., Zhao Z., Guo W., Wang Zh. Influence of Nb₂O₅ and basicity on the viscosity and structure of CaO–SiO₂–Nb₂O₅–CeO₂–CaF₂ slag system. *Metallurgical Research and Technology*. 2020, vol. 117, no. 3, article 307. <https://doi.org/10.1051/metal/2020023>
13. Istomin S.A., Krasikov S.A., Pastukhov E.A., Ryabov V.V. Effect of niobium-containing additions on the viscosity and electrical conductivity of oxide-fluoride melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2006, vol. 2006, no. 2, pp. 133–137. <https://doi.org/10.1134/S0036029506020054>
14. Ibrahim M., Bright Norman F.H. The binary system Nb₂O₅ – SiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006, vol. 45, no. 5, pp. 221–222. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11130.x>
15. Ibrahim M., Bright Norman F.H., Rowland J.F. The binary system CaO – Nb₂O₅. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006, vol. 45, no. 7, pp. 329–334. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11161.x>
16. Liu C., Qiu J., Sun L. Liquidus and phase equilibrium in CaO–SiO₂–Nb₂O₅–10 % La₂O₃ system. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 4, pp. 612–619. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-569>
17. Kim A.S., Zayakin O.V., Akberdin A.A., Kontsevoi Yu.V. Production and application of new complex boron-containing ferroalloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 12, pp. 21–24. (In Russ.).
18. Sariev O., Kim S., Zhumagaliyev Y., Kelamanov B., Sultanov M., Nurgali N. Viscosity and crystallization temperature of ferroalloy slags from Kazakhstan ore. *Metalurgiya*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 525–528.
19. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Esenzhulov A.B., Ostrovskiy Ya.I. The main directions of processing of poor domestic chromium ore raw materials. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 5, pp. 18–21. (In Russ.).
20. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-containing ferroalloys in steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.).
21. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G., Pronin L.A. *Physico-Chemical Methods for the Study of Metallurgical Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).
22. Shtengel'meier S.V., Prusov V.A., Bochegov V.A. Improvement of the viscosity measurement technique with a vibrating viscometer. *Zavodskaya laboratoriya*. 1985, vol. 51, no. 9, pp. 56–57. (In Russ.).
23. Akberdin A.A. *Selected Works*. Karaganda: PK "Ekozhn", 2008, 754 p.
24. Park H., Park J.-Y., Kim G.H., Sohn I. Effect of TiO₂ on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags. *Steel Research International*. 2012, vol. 83, no. 2, pp. 150–156. <https://doi.org/10.1002/srin.201100249>
25. Kim Y., Min D.-J. Viscosity and structural investigation of high-concentration Al₂O₃ and MgO slag system for FeO reduction in electric arc furnace processing. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 1169. <https://doi.org/10.3390/met11081169>
26. Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. *Properties of Liquid Blast Furnace Slags*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Вадимович Заякин, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

Руслан Рафикович Шартдинов, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0003-0852-1161

E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

Арте́м Николаевич Сметанников, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0001-9206-0905

E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

Илья Николаевич Кель, научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

Oleg V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

Ruslan R. Shartdinov, Junior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0003-0852-1161

E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

Artem N. Smetannikov, Junior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0001-9206-0905

E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

Il'ya N. Kel', Research Associate of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

О. В. Заякин – выбор объекта и методики исследования, обсуждение результатов, корректировка и написание статьи.

Р. Р. Шартдинов – проведение экспериментов, написание статьи, подготовка графиков.

А. Н. Сметанников – проведение экспериментов.

И. Н. Кель – подготовка образцов для экспериментов, анализ полученных данных, корректировка статьи и графиков, корреспонденция с редакцией.

O. V. Zayakin – selection of the object and methodology of the research, discussion of the results, correction and writing of the article.

R. R. Shartdinov – conducting the experiments, writing the article, preparing the graphs.

A. N. Smetannikov – conducting the experiments.

I. N. Kel' – preparation of the experimental samples, analysis of the data obtained, correction of the article and graphs.

Поступила в редакцию 21.10.2021

После доработки 15.03.2022

Принята к публикации 26.05.2022

Received 21.10.2021

Revised 15.03.2022

Accepted 26.05.2022