



Оригинальная статья

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2022-1-10-20



ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НИОБИЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

Л. И. Леонтьев^{1,2,3}, В. И. Жучков¹, О. В. Заякин¹,
А. В. Сычев¹, Л. Ю. Михайлова¹

¹ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

³ Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

Аннотация. В работе приведены сведения об областях применения ниобия и масштабах его производства в мире и РФ. Большинство ниобиевых месторождений России представлены пирохлоровыми, апатит-пирохлоровыми и колумбит-пирохлоровыми типами руд, которые содержат значительное количество фосфора. В связи с этим, все схемы обогащения данных руд содержат стадию дефосфорации, удорожающую продукт и снижающую степень извлечения ниобия. В работе изучена возможность усовершенствования сквозной схемы производства: ниобиевая руда – обогащение – ниобиевый ферросплав. Основная масса феррониобия предназначена для микролегирования стали и может быть заменена на комплексные ферросплавы с пониженным содержанием ниобия. Рассмотрены вопросы получения комплексных ниобиевых ферросплавов из бедного по ниобию черного концентрата. Установлено, что добавка к двухкомпонентной металлической системе Fe – Nb кремния (25 – 40 %) или алюминия (12 – 30 %) приводит к переводу ниобиевых ферросплавов из разряда тугоплавких в легкоплавкие материалы с температурой начала кристаллизации менее 1400 °С. Дано обоснование применения вместо феррониобия комплексного ниобиевого ферросплава, имеющего пониженное содержание ниобия и повышенное кремния или алюминия. Отмечаются более благоприятные служебные характеристики комплексного ферросплава по сравнению с феррониобием (температура начала кристаллизации и плотность), которые способствуют повышению степени усвоения ниобия при использовании комплексного ферросплава для микролегирования стали. Приводятся данные о возможности дефосфорации ниобиевых материалов методами пироселекции и возгонки фосфора в процессе высокотемпературной плавки с получением комплексных ферросплавов. Предложена усовершенствованная схема получения ниобийсодержащих ферросплавов с применением черновых ниобиевых концентратов, позволяющая проводить процесс выплавки с дефосфорацией и получением комплексного ферросплава с пониженным количеством ниобия и повышенным кремния (алюминия), который может более эффективно применяться для микролегирования стали.

Ключевые слова: ниобиевая руда, обогащение, комплексный ниобиевый ферросплав, дефосфорация, пироселекция, возгонка

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00252, <https://rscf.ru/project/21-19-00252/>.

Для цитирования: Леонтьев Л.И., Жучков В.И., Заякин О.В., Сычев А.В., Михайлова Л.Ю. Перспективы получения и применения комплексных ниобиевых ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 10–20.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>

Original article

POTENTIAL FOR OBTAINING AND APPLYING COMPLEX NIOBIUM FERROALLOYS

L. I. Leont'ev^{1,2,3}, V. I. Zhuchkov¹, O. V. Zayakin¹,
A. V. Sychev¹, L. Yu. Mikhailova¹

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

³ Russian Academy of Sciences (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. This paper provides information regarding the application of niobium in industry and the scale of its production in the world and the Russian Federation. Most of the niobium deposits in Russia consist of pyrochlore, apatitepyrochlore and columbitepyrochlore types of ores. They contain a significant amount of phosphorus. Therefore, all enrichment schemes for these ores contain a dephosphorization stage which increases the price of the product and reduces the degree of niobium extraction. The paper explores the possibility of improving the end-to-end production scheme: niobium ore – beneficiation – niobium ferroalloy. The bulk of ferrowniobium is intended for steel microalloying and can be replaced by complex ferroalloys with a reduced niobium content. The paper considers the issues of obtaining complex niobium ferroalloys from a rough concentrate with a weak content

of niobium. It has been established that the addition of 25 – 40 % of silicon or 12 – 30 % of aluminum to the twocomponent metal system Fe–Nb causes the transfer of niobium ferroalloys (15 – 20 % Nb) from the refractory category to lowmelting materials. The crystallization temperatures are less than 1400 °C. The substantiation of using a complex niobium ferroalloy instead of ferroniobium is given. This alloy has reduced niobium content and increased silicon or aluminum content. Higher service characteristics of the complex ferroalloy are noted in comparison with ferroniobium (temperature of the initiation of crystallization and density). They indicate an increased assimilation of niobium when using a complex ferroalloy for steel microalloying. The paper presents data on the possibility of dephosphorization of niobium concentrates in the process of pyrometallurgical production of a complex ferroalloy. An improved scheme for the production of niobiumcontaining ferroalloys is proposed. This consists of the use of niobium concentrate for melting the intermediate ferroalloy containing a reduced concentration of niobium oxides and an increased concentration of silicon (aluminum). This ferroalloy can be used effectively for steel microalloying with niobium.

Keywords: niobium ore, beneficiation, complex niobium ferroalloy, dephosphorization, pyroselection, diatillation

Funding: The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00252, <https://rscf.ru/project/21-19-00252/>.

For citation: Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Sychev A.V., Mikhailova L.Yu. Potential for obtaining and applying complex niobium ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 10–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря уникальным свойствам, редкие металлы (РМ) и их соединения играют ключевую роль в научно-техническом прогрессе, являясь базовыми компонентами многих высокоэффективных материалов и технологий [1]. Из 36 РМ 19 входят в перечень основных видов стратегического минерального сырья, в том числе ниобий¹ [2 – 4].

Ежегодный спрос на ниобий в мире достигает 100 тыс. т. Примерно 90 % ниобия в виде ферросплава (феррониобий, 60 – 65 % Nb) потребляется сталеплавильной промышленностью для легирования и производства конструкционных высокопрочных сталей, жаропрочных, жаростойких и сверхпроводниковых сплавов [5 – 7].

В настоящее время основными факторами, определяющими рынок ниобия, являются увеличение потребления ниобия в конструкционной стали и широкое использование сплавов на основе ниобия в производстве авиационных двигателей² [8].

Рост применения ниобия в последние десятилетия в России и во всем мире во многом связан с тем, что ранее он использовался для повышения коррозионной стойкости жаропрочных и нержавеющей сталей (1 – 2 % Nb), а в настоящее время в основном применяется для упрочняющего эффекта в конструкционных сталях в десятых долях процента (изготовление нефтегазовых труб большого диаметра, мостов, деталей в автомобиле- и судостроении и др.) [7, 9].

В России потребление феррониобия увеличилось с 200 – 300 т/год в конце 90-х годов прошлого столетия

до 4,5 тыс. т/год в настоящее время. При этом собственное производство ниобиевой продукции в РФ составляет не более 550 т/год, закрывая внутреннюю потребность экспортом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Производство ниобия и его сплавов начинается с рудного сырья [10 – 14].

На сегодняшний день в России основной разрабатываемой минерально-сырьевой базой ниобия является Ловозерское редкоземельно-ниобиевое месторождение в Мурманской области [15]. ООО «Ловозерский ГОК» ведет добычу руды, которая после обработки в виде лопаритового концентрата поступает на ОАО «Соликамский магниевый завод» для получения оксида ниобия. При переработке лопаритового концентрата на Соликамском магниевом заводе получают редкоземельные и титановые продукты, танталовые соединения и ниобиевые товарные продукты. Национальное производство ниобиевого сырья в России исчезающе мало и обеспечивает всего 6 – 9 % существующего потребления ниобиевых продуктов³. В то же время Россия располагает перспективными источниками минерального сырья, пригодного для организации производства ниобийсодержащих материалов.

По количеству балансовых запасов ниобия РФ занимает второе место в мире после Бразилии [12, 16]. На государственном балансе числится 42 месторождения, в том числе 8 – только с забалансовыми запасами [6, 15].

Другие известные в России ниобиевые месторождения представлены многокомпонентными объектами, требующими комплексного извлечения полезных ископаемых и компонентов, имеющих различную конъюнктуру и объемы сбыта, что повышает риски их освоения [6, 17, 18]. Катугинское месторождение в щелочных породах в Забайкальском крае с запасами

¹ Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов в Российской Федерации на период до 2035 года. М.: Минпромторг России, 2019. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!/strategiya-razvitiya-otrasli-redkih-i-redkozemelnyh-metallov-rossiyskoy-federacii-na-period-do-2035-goda>

² 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>

³ Годовые отчеты - Соликамский магниевый завод. Годовой отчет за 2020 год. URL: <https://smw.ru/shareholder/everyyear/>

0,47 млн т Nb_2O_5 со средним содержанием Nb_2O_5 в рудах 0,31 % включает редкоземельную ($\Sigma TR - 0,25$ %), циркониевую ($ZrO_2 - 1,38$ %) и криолитовую минерализацию, что затрудняет его комплексное освоение. В Иркутской области находится Nb–TR-фосфатное месторождение Белозиминское, представляющее собой литофицированную кору выветривания по карбонатам с ресурсами 0,75 млн т Nb_2O_5 со средним содержанием 1,5 % Nb_2O_5 . Наиболее перспективным считается Томторское месторождение в Республике Саха-Якутия с редкоземельно-редкометалльной минерализацией в карбонатах с ресурсами 1,2 млн т Nb_2O_5 при среднем содержании 3,99 % Nb_2O_5 . В его пределах выделяется супербогатый участок Буранный, включающий 8 % ресурсов месторождения со средним содержанием 6,7 % Nb_2O_5 и 9,3 % TR_2O_3 . Кроме вышеприведенных подготовленных ниобиевых объектов в России известны и другие ниобиевые месторождения:

- в карбонатах: Чуктуконское, Татарское (Красноярский край), Арбарастах, Горноозерское (Республика Саха-Якутия), Среднезиминское, Большетагинское (Иркутская область), Неске-Вара (Мурманская область);

- в щелочных гранитах и сиенитах: Улуг-Танзегское (Республика Тыва), Зашихинское (Иркутская область), Тайкеу, Лонгот-Юган и Усть-Мраморное (Ямало-Ненецкий округ);

- в пегматитах: Вишняковское, Гольцовое (Иркутская область), Колмозерское, Ролмостундровское (Мурманская область) [10, 15, 17 – 22].

Для получения пригодного для производства ниобиевых ферросплавов сырья руда проходит стадию обогащения, продуктом которого является концентрат.

Ниобий и тантал получают преимущественно из танталитокolumбитовых, пирохлоровых, лопаритовых руд. Плотность ниобийтанталовых минералов указанных руд более $4,5 \text{ г/см}^3$, поэтому основным методом их обогащения является гравитационный. Как правило, руды россыпных и коренных месторождений содержат сопутствующие тяжелые минералы: магнетит, рутил, ильменит, циркон, монацит, касситерит и др., а также часто встречающиеся минералы лития, бериллия, плотность которых близка к плотности минералов вмещающих пород (полевые шпаты, кварц). В процессе гравитационного обогащения ниобийтанталовых руд на винтовых сепараторах, концентрационных столах получают коллективные концентраты тяжелых металлов [23].

При обогащении тонковкрапленных руд тяжелые минералы выделяются лишь при тонком измельчении руды, что приводит к потерям ниобия и тантала с мелкими (шламовыми) фракциями, составляющими более 50 %.

При содержании в руде 0,2 – 0,4 % Nb_2O_5 извлечение пирохлора в черновые концентраты превышает

60 – 70 %, а при доводке их до кондиционных с содержанием 35 – 40 % Nb_2O_5 извлечение пирохлора в концентрате может снизиться до 40 – 50 %.

При доводке черновой концентрат подвергается грохочению на четыре класса, каждый класс в отдельности направляется на магнитную сепарацию. Магнитная фракция подвергается двукратной перемешке, а немагнитная фракция классов $\pm 0,2$ мм направляется на флотогравитацию сульфидов и апатита, в результате которой получается кондиционный пирохлоровый концентрат. Немагнитная фракция крупностью $-0,2$ мм направляется на флотацию сульфидов и апатита, после которой хвосты подвергаются концентрации на столах. Концентраты столов направляются на сфеногранатовую флотацию, в результате которой получают кондиционный пирохлоровый концентрат и сфеногранатовый продукт.

При обогащении ниобийсодержащего сырья любых месторождений любыми методами образуются промежуточные продукты, которые по мере интенсивности обогащения становятся не только чище, но и дороже [24 – 26].

В промежуточных черновых ниобиевых концентратах содержится более низкое содержание Nb_2O_5 и более высокое вредных примесей (P_2O_5 , SiO_2 и др.). Например, черновые концентраты, полученные из руд Белозиминского месторождения, содержат 15 – 25 % Nb_2O_5 и 3 – 7 % P_2O_5 . Доводка этих материалов до кондиционных концентратов приводит к значительным потерям Nb_2O_5 (до 20 – 50 %) и увеличению их стоимости. По действующим в России техническим требованиям пирохлоровый рудный концентрат для получения феррониобия должен содержать $(Nb, Ta)_2O_5$ не менее 38 %, примесей на 1 % $(Nb, Ta)_2O_5$ не более, %: 0,003 P; 0,005 S; 0,005 C; 0,32 SiO_2 ; 0,35 TiO_2 ; 1,0 влаги [1].

В большинстве ферросплавов содержание ведущего элемента по ГОСТу должно быть достаточно высоким (65 – 90 %), что приводит к необходимости соответствующей его концентрации и в рудном сырье для плавки.

Имеется целый ряд исследований [27 – 29], а также производственных данных о том, что стандартные ферросплавы часто не обладают всеми необходимыми служебными характеристиками [30 – 32]. Стандарты на большинство марок ферросплавов разрабатывались еще в середине прошлого века под существующие сталеплавильные технологии.

В тоже время повышение содержания во многих ферросплавах ведущего элемента (Cr, V, W, Mo) увеличивает температуру плавления сплава, что способствует более медленному его плавлению и растворению в стали [33 – 35]. Например, температура начала кристаллизации (t_n) высокоуглеродистого феррохрома, содержащего 45 % Cr, составляет 1570 °C; 48 % Cr – 1580 °C; 53,3 % Cr – 1600 °C и 63 % Cr – 1620 °C [36].

Феррованадий, содержащий 35 % V, имеет $t_n = 1450$ °С, а 50 и 75 % V соответственно на 60 и 210 °С больше [29]. Для бинарных сплавов системы Mo–Fe повышение содержания молибдена выше 37,5 % приводит к значительному росту t_n , превышающему 1650 °С.

Температуру плавления ферросплавов можно снижать путем ввода в них таких элементов, как кремний и алюминий. Их присутствие в ферросплаве не снизит сферу его применения, поскольку эти элементы присутствуют практически во всех марках стали.

Получаемые многокомпонентные (комплексные) ферросплавы рационально применять для микролегирования металла такими элементами, как Nb, V, B и др. Малая масса вводимых микроэлементов позволяет иметь в комплексном ферросплаве пониженное их содержание, а наличие в сплаве кремния и алюминия не ограничивает в рудном сырье, применяемом при выплавке этих ферросплавов, оксидов SiO_2 и Al_2O_3 [37].

Основная масса феррониобия предназначена для микролегирования стали и может быть заменена на комплексные ферросплавы с пониженным содержанием ниобия.

Подбором целевых и сопутствующих элементов сплава можно определить его рациональный состав, обеспечивающий высокое и стабильное усвоение полезных элементов, быстрое плавление и равномерное их распределение в объеме расплава.

Изучены физико-химические свойства синтетических ниобийсодержащих сплавов систем Nb–Fe, Nb–Si–Fe и Nb–Al–Fe с целью определения приемлемого химического состава ферросплава.

Химический состав ниобиевого ферросплава должен с одной стороны соответствовать продукту, получаемому при обогащении (концентрату), а с другой удовлетворять требованиям сталеплавильщиков к ферросплавам, предназначенным для микролегирования стали ниобием в ковше.

Наиболее применяемый для обработки стали феррониобий (50 – 60 % Nb) имеет высокую температуру плавления (1560 – 1900 °С). Это создает ряд трудностей при вводе ниобия в стальную ванну (особенно при ковшевом легировании) – увеличиваются время плавления и растворения ниобия, снижается его усвоение сталью, затягивается время плавки, требуются дробление ферросплава до <5 – 10 мм и продувка расплава.

При разработке состава новых ниобийсодержащих ферросплавов учитывалось, что:

- ферросплав должен иметь температуру начала плавления не выше 1400 °С и быстро плавиться;
- ферросплав будет использоваться в основном для микролегирования стали (0,02 – 0,05 % Nb);
- ферросплав должен иметь плотность ниже плотности жидкой стали (6 – 7 г/см³);
- для снижения угара ниобия в сплаве должны быть химически активные элементы (Si, Ca, Al), соответствующие обрабатываемой марке стали.

Для исследований выплавлены образцы ниобийсодержащих сплавов двух- и трехкомпонентных систем. Химический состав ферросплавов представлен в табл. 1.

Определение температур начала кристаллизации проводилось методом фиксирования температурных кривых при охлаждении расплава. Плотность ниобийсодержащих сплавов определяли пикнометрическим методом.

Результаты определения температур начала кристаллизации сплавов представлены на рис. 1.

Температуры начала кристаллизации двойной системы Fe–Nb удовлетворительно согласуются с линией ликвидуса на диаграмме состояния, для отдельных составов несовпадение составляет 20 – 70 °С. Из всех рассматриваемых двухкомпонентных сплавов только феррониобий с низким содержанием Nb (10 %) относится к категории легкоплавких материалов ($t_n = 1390$ °С), остальные сплавы системы Fe–Nb, содержащие Nb > 20 %, относятся к категории тугоплавких ($t_n > 1500$ °С).

В тройной системе Fe–Si–Nb (разрез Fe/Nb = 3) могут существовать легкоплавкие эвтектики и тугоплавкие силициды типа $(\text{Fe} + \text{Nb})_n \cdot \text{Si}_m$. Последние, по-видимому, влияют на t_n при содержании 20 % Si. Дальнейший рост содержания кремния (до 40 %) снижает температуру начала кристаллизации в связи с переходом системы в область легкоплавких эвтектик.

Таблица 1

Химический состав синтетических ниобиевых ферросплавов*, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of synthetic niobium ferroalloys*, % (wt)

Марка сплава	Nb	Si	Al
ФН10	10,0	–	–
ФН30	30,0	–	–
ФН45	45,0	–	–
ФН50	50,0	–	–
ФНС10	22,5	10,0	–
ФНС20	20,0	20,0	–
ФНС25	18,7	25,0	–
ФНС30	17,5	30,0	–
ФНС40	15,0	40,0	–
ФНА5	23,7	–	5,0
ФНА10	22,5	–	10,0
ФНА15	21,2	–	15,0
ФНА20	20,0	–	20,0
ФНА30	17,5	–	30,0

* Остальное железо

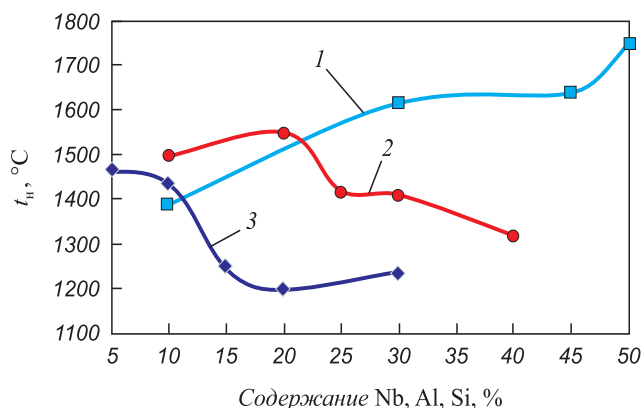


Рис. 1. Зависимость температур начала кристаллизации ниобийсодержащих сплавов от концентрации:
1 – ниобия в двухкомпонентной системе Fe–Nb; 2 – кремния в трехкомпонентной системе Fe–Si–Nb при Fe/Nb = 3;
3 – алюминия в трехкомпонентной системе Fe–Al–Nb при Fe/Nb = 3

Fig. 1. Dependence of the crystallization initiation temperature of niobium-containing alloys on the concentration of:

1 – niobium in the two-component Fe–Nb system; 2 – silicon in the three-component system Fe–Si–Nb at Fe/Nb = 3; 3 – aluminum in the three-component system Fe–Al–Nb at Fe/Nb = 3

В системе Fe–Al–Nb (разрез Fe/Nb = 3) в составе сплава отсутствуют тугоплавкие соединения во всем рассмотренном диапазоне содержания алюминия (5–30 %), и так же, как в двойных сплавах Al–Fe и Al–Nb, увеличение количества алюминия снижает температуру начала кристаллизации.

Добавка к двухкомпонентной металлической системе Fe–Nb кремния (25–40 %) или алюминия (12–30 %) приводит к переводу ниобиевых ферросплавов (15–20 % Nb) из разряда тугоплавких в легкоплавкие материалы с температурой начала кристаллизации менее 1400 °C.

Промышленные сплавы характеризуются дополнительным наличием примесей (Ti, Ca и другие), в то же время значения t_n у промышленных сплавов и у аналогичных синтетических близки. Сопоставляя полученные результаты с имеющимися литературными данными, следует отметить их качественное соответствие.

Результаты определения плотности металлических сплавов систем Fe–Nb, Fe–Si–Nb и Fe–Al–Nb представлены на рис. 2. Установлено, что наибольшую плотность имеют двойные железониобиевые сплавы, добавки легких металлов кремния и алюминия уменьшают плотность сплавов. Снижение содержания ниобия до 10 % в двойном сплаве Fe–Nb, хотя и способствует понижению плотности сплавов с 8250 до 7650 кг/м³, но не позволяет перевести данные сплавы в разряд материалов, обладающих оптимальными значениями плотности. Для дальнейшего снижения плотности в двухкомпонентную систему необходимо вводить легкие металлы, например, кремний или алюминий. Исследуемые трехкомпонентные сплавы Fe–Si–Nb и Fe–Al–Nb с содержанием более 25 % Si или более

15 % Al обладают рациональными значениями плотности как с точки зрения их производства, так и применения для обработки стального расплава.

По сравнению с комплексными ниобиевыми сплавами феррониобий (ФН) обладает наименее благоприятными физико-химическими характеристиками. У него самая большая температура начала кристаллизации и плотность выше, чем у жидкой стали (>7000 кг/м³).

Исследования показали, что снижение температур начала кристаллизации комплексных ниобиевых сплавов происходит при понижении содержания ниобия и увеличении концентрации кремния или алюминия. Трехкомпонентные сплавы Fe–Si–Nb и Fe–Al–Nb с содержанием 15–20 % Nb, 32–40 % Si или 12–30 % Al относятся к категории легкоплавких ферросплавов. Для достижения рациональных значений плотности в двухкомпонентную систему необходимо вводить легкие металлы, например, кремний (25–40 %) или алюминий (15–30 %).

Таким образом, лучшими физико-химическими характеристиками, обеспечивающими высокие служебные свойства, обладают комплексные ниобиевые сплавы ФНС и ФНА, которые рекомендуются для широкого использования при ковшем микролегировании сталей.

Эти сплавы быстро плавятся, находясь в объеме жидкой стали, а ниобий предохраняется от окисления кремнием (алюминием) комплексного сплава, что способствует более высокому усвоению ведущего элемента.

Комплексные ферросплавы были успешно применены при микролегировании ниобием стали, идущей на изготовление вагонных стоек, газопроводных труб большого диаметра (сталь 9Г2ФБ, 10Г2БД) на Нижнетагильском и Новоліпецком металлургических комби-

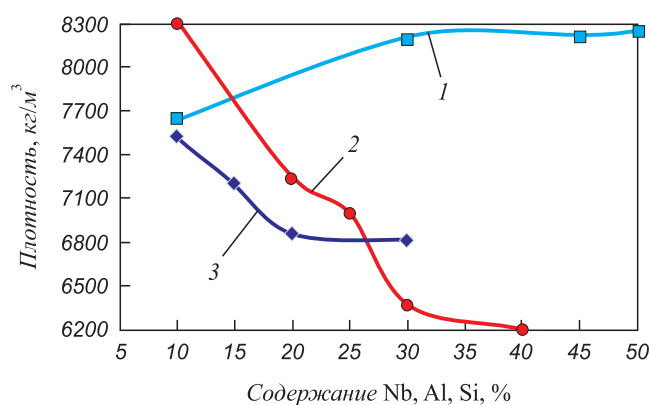


Рис. 2. Зависимость плотности ниобийсодержащих сплавов от концентрации:

1 – ниобия в двухкомпонентной системе Fe–Nb; 2 – кремния в трехкомпонентной системе Fe–Si–Nb при Fe/Nb = 3;
3 – алюминия в трехкомпонентной системе Fe–Al–Nb при Fe/Nb = 3

Fig. 2. Dependence of the density of niobium-containing alloys on the concentration of:

1 – niobium in the two-component Fe–Nb system; 2 – silicon in the three-component system Fe–Si–Nb at Fe/Nb = 3; 3 – aluminum in the three-component system Fe–Al–Nb at Fe/Nb = 3

натах, автомобильном заводе им. Лихачева. Угар ниобия на всех плавках составил не более 4,5 % (выше, чем при использовании феррониобия на 10 – 25 %), отмечены получение более мелкого зерна феррита за счет внедрения карбонитридов ниобия, более равномерное распределение ниобия в объеме металла, улучшение формы неметаллических включений.

Большинство ниобиевых месторождений России представлены пироксеновым, апатит-пироксеновым, колумбит-пироксеновым типами руд, которые содержат значительное количество фосфора. Поэтому все схемы обогащения этих руд содержат стадию дефосфорации, удорожающую продукт и снижающую степень перехода в него ниобия. В тоже время при пирометаллургическом получении комплексных ниобиевых ферросплавов можно выплавлять сплавы с пониженной концентрацией фосфора.

В ИМЕТ УрО РАН изучена возможность переработки черновых концентратов, полученных из апатит-пироксеновых руд Белозиминского месторождения, с дефосфорацией методами пироселекции и возгонки фосфора.

Трудность проведения пироселекции связана с тем, что в результате плавки необходимо при глубоком восстановлении и переходе в металл фосфора практически полностью оставить в шлаке ниобий. В то же время селективное восстановление является сложным физико-химическим комплексом процессов восстановления различных оксидов, взаимодействия королек восстановленного металла между собой и со шлаком, коагуляции металлических капель, их осаждения и т. д.

В лабораторных условиях изучались физико-химические характеристики концентратов и влияние различных факторов (количества и вида восстановителя, флюса и осадителя, вязкости расплава, температуры процесса, его продолжительности) на селективное восстановление железа и фосфора, обеспечивающее получение шлака с отношением Nb/P > 20.

Изучено получение комплексного ниобиевого ферросплава из высокофосфористого концентрата с пироселекцией фосфора. Концентрат содержал, %: 47,1 Nb₂O₃; 1,2 P₂O₅; 15,8 CaO; 8,8 SiO₂; 1,2 FeO; 1,5 Al₂O₃. В качестве восстановителя применялся кокс, осадителя – чугунная стружка.

Установлена целесообразность двухступенчатой плавки. На первой ступени при 1260 – 1450 °С проводили восстановление железа и фосфора, на второй – при 1410 – 1450 °С после окончания реакции восстановления снижали вязкость расплава и осаждали королеку металла.

Экспериментально определено оптимальное количество шихтовых материалов: кокса не менее стехиометрически необходимого на восстановление железа и фосфора, чугунной стружки ~15 % от массы концентрата.

Эта схема была рекомендована для дальнейших испытаний.

Промышленные плавки по дефосфорации пироселекцией кондиционных концентратов были проведены в печи с трансформатором мощностью 1100 кВА.

В качестве сырья применяли кондиционный ниобиевый концентрат (38,0 % Nb₂O₅; 4,5 – 6,4 % P₂O₅; 11,4 – 14,6 % Fe₂O₃), чугунную стружку и кокс (68 – 73 % С).

Для достижения в шлаке низкого содержания фосфора (<0,5 %) при незначительном восстановлении ниобия следовало иметь в шихте избыток восстановителя 20 – 40 % от стехиометрически необходимого на восстановление железа и фосфора. Получены удовлетворительные результаты. Содержание фосфора в шлаке находилось на достаточно низком уровне (0,1 – 0,3 %) при 34 – 39 % Nb₂O₅, около 99 % фосфора перешло в металл и в газовую фазу, восстановление и переход ниобия в металл составили менее 1 %. Всего было получено 3 т шлака.

Промышленная технология показала принципиальную возможность проведения дефосфорации пироселекцией в электропечи с удовлетворительными показателями. Полученный низкофосфористый ниобийсодержащий шлак после дробления может быть использован для производства феррониобия по существующим технологическим схемам.

Изучена дефосфорация методом возгонки для высокофосфористого ниобиевого сырья.

Термодинамическим методом проведено моделирование силикотермического получения ниобиевых ферросплавов из высокофосфористых концентратов. Термодинамическое моделирование (ТДМ) проведено с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6.0, позволяющего производить расчеты равновесных составов и количеств образующихся продуктов по алгоритму минимизации энергии Гиббса на основе представлений о металлургических расплавах как об идеальных растворах [38, 39].

В табл. 2 приведен состав расчетного концентрата.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования.

Показано, что при введении кремния в количестве, стехиометрически необходимом для восстановления железа, ниобия, титана и фосфора из оксидов, не происходит полного восстановления ниобия и титана из-за образования в сплаве прочных силицидов ниобия, при этом железо полностью восстанавливается. При увеличении кремния до 130 % от стехиометрии ниобий переходит в металлическую фазу на 98,5 и 97 % соответственно для составов № 1 и 2. При дальнейшем увеличении количества восстановителя степень извлечения ниобия стремится к 100 %. Избыток кремния до 250 % позволяет повысить степень извлечения титана до 86 – 88 %.

С повышением количества введенного кремния в систему извлечение фосфора в сплав снижается за счет его возгонки в газовую фазу. Для состава № 1 мак-

Таблица 2

Химический состав ниобиевого концентрата

Table 2. Chemical composition of niobium concentrate

Номер	Содержание, %							
	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO
1	45	2	15	23	2	9	3	1
2	14	13	13	25	2	3	29	1

симальная степень возгонки фосфора достигается при 156 % кремния и составляет 52, 59 и 65 % для температур 1500, 1600 и 1700 °С соответственно (рис. 3, а). При дальнейшем росте содержания восстановителя степень возгонки увеличивается незначительно (не более 1 %). Для состава № 2 максимальная степень возгонки фосфора достигается только при 250 % кремния и составляет 67, 73 и 78 % для температур 1500, 1600 и 1700 °С соответственно (рис. 3, б).

На рис. 4 представлен состав образующейся металлической фазы в зависимости от количества восстановителя. При стехиометрическом количестве кремния, введенного в систему, формируемая металлическая фаза для концентрата состава № 1 будет со-

держат, %: 79 Nb, 7,0 Si, 6,0 Fe, 1,2 P, 0,02 Ti. При избытке восстановителя 240 % металлическая фаза будет содержать, %: 49 Nb, 45 Si, 3,0 Fe, 0,4 P, 7,0 Ti. Для концентрата состава № 2 металлическая фаза при стехиометрическом количестве кремния будет содержать, %: 24 Nb, 7 Si, 59 Fe, 12 P, 0,01 Ti, а при избытке кремния 240 % будет содержать, %: 15 Nb, 49 Si, 31 Fe, 2,4 P, 2,5 Ti. Наилучшие показатели по остаточному содержанию фосфора (0,4 %) в металле достигнуты при переработке концентрата состава № 2 с получением высококремнистого сплава (45 % Si).

Проведенный термодинамический анализ силикотермического получения комплексных ферросплавов из высокофосфористых ниобиевых концентратов пока-

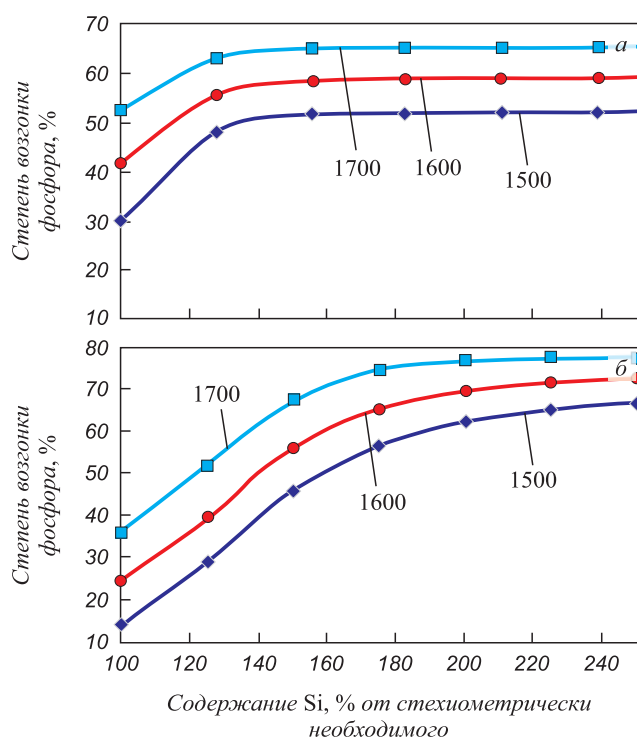


Рис. 3. Зависимость степени возгонки фосфора от содержания кремния и температуры:
а – ниобиевый концентрат состава № 1; б – ниобиевый концентрат состава № 2 (см. табл. 2)

Fig. 3. Dependence of the phosphorus distillation degree on the silicon content and temperature:
а – niobium concentrate of composition No. 1; б – niobium concentrate of composition No. 2 (Table 2)

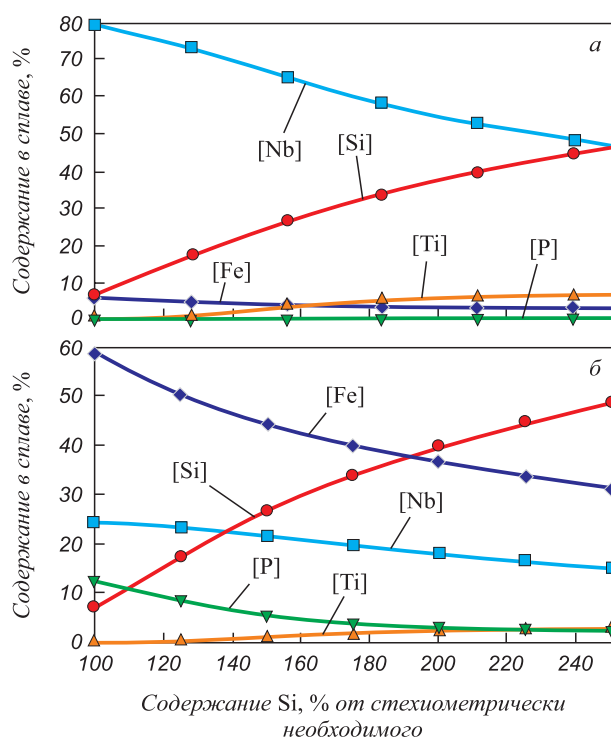


Рис. 4. Зависимость содержания Nb, Fe, P, Ti в металле от содержания кремния при 1600 °С:
а – ниобиевый концентрат состава № 1; б – ниобиевый концентрат состава № 2 (см. табл. 2)

Fig. 4. Dependence of the content of Nb, Fe, P, Ti in the metal on silicon content at 1600 °C:
а – niobium concentrate of composition No. 1; б – niobium concentrate of composition No. 2 (Table 2)

зал, что для восстановления ниобия на 97 – 99 % при температуре 1600 °С необходим избыток восстановителя (кремния) не менее 30 – 35 % от стехиометрически необходимого на полное восстановление металлов и фосфора, что объясняется образованием прочных силицидов ниобия. С увеличением температуры с 1500 до 1700 °С степень возгонки фосфора увеличивается. Максимальная степень возгонки фосфора составляет 77 % при температуре 1700 °С для исходного концентрата, содержащего 13 % P_2O_5 . Наилучшие показатели по остаточному содержанию фосфора в металле достигнуты при переработке концентрата с 45 % Nb_2O_5 и 2 % P_2O_5 с получением комплексного сплава, содержащего, %: 49 Nb, 45 Si, 7,0 Ti, 0,4 P.

В полупромышленных условиях изучали влияние технологических параметров плавки на возгонку фосфора и восстановление ниобия. Плавки проводили на одноэлектродной электропечи с проводящей подиной мощностью 55 – 80 кВА, шихта состояла из кварцита (97,5 % SiO_2), полукокса (53,0 % C; 27,0 % Ас; 7,0 % V^г; 8,6 % W^а), ниобиевого концентрата (12,9 % Nb_2O_5 ; 7,7 % P; 26,2 % Fe_2O_3 ; 26,4 % CaO; 9,0 % SiO_2), частично обесфосфоренного ниобиевого шлака (5 – 8 % Nb_2O_5 ; 0,4 – 1,5 % P; 23 – 42 % SiO_2). Было проведено 48 плавов. Содержание кремния в сплаве поддерживали на уровне 30 – 50 %. Плавки проводили непрерывным бесшлаковым карботермическим процессом с закрытым колошником.

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность получения силикониобия возгонкой фосфора бесшлаковым процессом с требуемой степенью дефосфорации. Лучшим сырьем для плавки явился кусковый частично обесфосфоренный ниобиевый шлак.

В результате проведенных исследований по получению комплексного сплава ферросиликониобия установлена зависимость содержания фосфора от концентрации кремния в сплаве (рис. 5). Кроме кремния на содержание [P] влияет марганец, с увеличением концентрации которого повышается содержание фосфора в сплаве при равной концентрации кремния.

При отработке технологии в промышленных условиях в качестве плавильного агрегата использовали электропечь мощностью 1200 кВА. На первой стадии в качестве шихты использовали кварцит, кокс и ниобиевый концентрат, который содержал, %: 25,2 Nb_2O_5 ; 8,8 P; 20,7 Fe_2O_3 ; 23,1 CaO; 7,0 SiO_2 . В шлак перешло 45 % P и 96 % Nb. Шлак содержал 29,6 % Nb_2O_5 и 5,1 % P, металл – 1,1 % Nb; 17,4 % P. В результате селективной плавки получено частично дефосфорированное, обогащенное и окускованное сырье (в виде шлака) для следующего этапа переработки и феррофосфориониобиевый сплав, который можно использовать для легирования отдельных марок чугуна и стали.

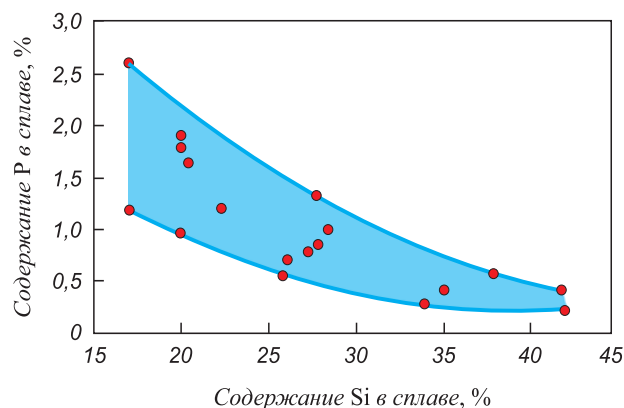


Рис. 5. Зависимость содержания фосфора от количества кремния в сплаве

Fig. 5. Dependence of phosphorus content on silicon amount of in the alloy

Вторую стадию проводили в той же печи, футерованной угольными блоками, непрерывным процессом с получением ферросиликониобия. Шихта состояла из шлака, кокса и кварцита. Технологический процесс плавки проходил нормально, во время выпуска выходило небольшое количество шлака (<100 кг/т сплава). Извлечение ниобия в сплав было высоким – 97 %. Усредненный состав сплава: 16,5 % Nb; 0,4 % P; 40,6 % Si; остальное железо. Всего было получено ~100 т сплава. Дефосфорация путем перевода фосфора в газовую фазу составила 90 %, в сплаве Nb/P = 38.

Данная технология может быть использована в дальнейшем только в герметичных руднотермических печах типа фосфорных с улавливанием и утилизацией фосфора.

Промышленное опробование различных технологических схем выплавки комплексных ниобиевых ферросплавов из концентратов Белозиминского месторождения показало принципиальную возможность дефосфорации при восстановительной карботермической плавке с получением 0,3 – 0,4 % P и высоким содержанием кремния в ферросплаве.

Выводы

Таким образом, предлагается усовершенствованная схема получения ниобийсодержащих ферросплавов, заключающаяся в применении для плавки полупродукта ниобиевого концентрата, содержащего пониженную концентрацию оксидов ниобия и повышенную фосфора. Данная технология позволяет проводить процесс выплавки с дефосфорацией и получением комплексного ферросплава с пониженным количеством ниобия, повышенным кремния (алюминия), который может более эффективно использоваться для микролегирования стали ниобием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 24-2017. Производство редких и редкоземельных металлов. Москва: Бюро НДТ, 2017. 202 с.
2. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Рудная база стратегических редких металлов России: состояние, перспективы освоения и развития // Горный журнал. 2017. № 7. С. 4–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.07.01>
3. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine // Niobium, Science and Technology: Proceedings of the Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States, 2001. Code 62351. P. 29–35.
4. Geological U.S. Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston. 2016. P. 117.
5. Волков А.И. Состояние и перспективы использования редких металлов в черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 11–18.
6. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусов 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.
7. Silvestre L., Langenberg P., Amaral T., Carboni M., Meira M., Jordão A. Use of niobium high strength steels with 450 MPA yield strength for construction // HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015 Conf. Proceedings. 2015. P. 931–939.
8. 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.
9. Лисов В.И. Редкие металлы России: Ресурс технологических инноваций. Москва: ЦентрЛитНефтегаз, 2018. 509 с.
10. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России // Труды научно-практической конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ». Екатеринбург: Альфа-Принт, 2018. С. 36–46.
11. 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.
12. Alves A.R., Coutinho A.R. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil // Minerals Engineering. 2019. Vol. 132. P. 275–283.
13. Wang G., Du Y.X., Wang J.S., Xue Q.G. Carbothermic reduction behaviors of Ti–Nb-bearing Fe concentrate from Bayan Obo ore in China // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 25. No. 1. P. 28–36. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1543-5>
14. Zhang Q.F. Analysis on mineralogical characteristics of niobium-bearing resources in Baiyuebo deposit // Nonferrous Metals. 2005. Vol. 57. No. 2. P. 111.
15. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации 2019 году». Москва: «ВНИГНИ», «Гидроспецгеология». 2019. 426 с.
16. Alves A.R., Coutinho A.R. The evolution of niobium production in Brazil // Materials Research. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 106–112. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.276414>
17. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Редкометалльное сырье России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Разведка и охрана недр. 2016. № 11. С. 26–30.
18. Mashkovtsev G.A., Bakanova T.V. On mineral resources for ferroalloy production // Theoretical and Practical Conf. with Int. Par-
1. Information and technical guide to the best available technologies. ITS 24-2017. Production of rare and rare earth metals. Moscow: Byuro NDT, 2017, 202 p. (In Russ.).
2. Bykhovskiy L.Z., Arkhipova N.A. Strategic rare metal supply in Russia: Current state & future prospects. Gornyi zhurnal. 2017, no. 7, pp. 4–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.07.01>
3. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine. In: Niobium, Science and Technology: Proceedings of the Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States, 2001, Code 62351, pp. 29–35.
4. Geological U.S. Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, 2016, p. 117.
5. Volkov A.I. State and prospects for use of rare metals in ferrous metallurgy. Razvedka i okhrana nedr. 2020, no. 3, pp. 11–18. (In Russ.).
6. Nechaev A.V., Polyakov E.G., Belousov 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.).
7. Silvestre L., Langenberg P., Amaral T., Carboni M., Meira M., Jordão A. Use of niobium high strength steels with 450 MPA yield strength for construction. In: HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015 Conf. Proceedings, pp. 931–939.
8. 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.
9. Lisov V.I. Rare Metals of Russia: A Resource for Technological Innovation. Moscow: TsentrLitNeftegaz, 2018, 509 p. (In Russ.).
10. Melent'ev G.B. Prospects for the provision of own rare-metal raw materials and development of ferroniobium production in Russia. In: Theoretical and Practical Conf. with Int. Participation and School for Young Scientists "FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development". Yekaterinburg: Al'fa-Print, 2018, pp. 36–46 (In Russ.).
11. 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.
12. Alves A.R., Coutinho A.R. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. Minerals Engineering. 2019, vol. 132, pp. 275–283.
13. Wang G., Du Y.X., Wang J.S., Xue Q.G. Carbothermic reduction behaviors of Ti–Nb-bearing Fe concentrate from Bayan Obo ore in China. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2018, vol. 25, no. 1, pp. 28–36. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1543-5>
14. Zhang Q.F. Analysis on mineralogical characteristics of niobium-bearing resources in Baiyuebo deposit. Nonferrous Metals. 2005, vol. 57, no. 2, pp. 111.
15. State report "State and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2019". Moscow: All-Russian Research Geological Oil Institute, Gidrospegeologiya, 2019, 426 p. (In Russ.).
16. Alves A.R., Coutinho A.R. The evolution of niobium production in Brazil. Materials Research. 2015, vol. 18, no. 1, pp. 106–112. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.276414>
17. Bykhovskii L.Z., Arkhipova N.A. Rare-metal raw materials of Russia: Prospects and development of mineral resource base. Razvedka i okhrana nedr. 2016, no. 11, pp. 26–30 (In Russ.).
18. Mashkovtsev G.A., Bakanova T.V. On mineral resources for ferroalloy production. In: Theoretical and Practical Conf. with Int.

- participation and School for Young Scientists “FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development”. 2019. P. 29–45.
19. Морозова Л.Н., Баянова Т.Б., Базай А.В. и др. Редкометалльные пегматиты Колмозерского литиевого месторождения арктического региона Балтийского щита: новые геохронологические данные // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 1 (9). С. 43–52.
20. Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор: геология, технологии, экономика // ЭКО. 2014. № 2 (476). С. 36–44.
21. Новые минерально-сырьевые металлургические комплексы России (краткий обзор) / Под ред. Г.А. Машковцева. Москва: ВИМС, 2007. 44 с.
22. Нечаев А.В., Смирнов А.В., Сибилев А.С. и др. Гидрометаллургическая переработка колумбитового концентрата Зашихинского месторождения // Химическая технология. 2017. Т. 18. № 2. С. 81–88.
23. Маслов А.А., Оствальд Р.В., Шагалов В.В. и др. Химическая технология ниобия и тантала. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 97 с.
24. Liu M.D., You Z.X., Peng Z.W. Enrichment of rare earth and niobium from a REE–Nb–Fe associated ore via reductive roasting followed by magnetic separation // JOM. 2016. Vol. 68. No. 2. P. 567–576. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1679-y>
25. Xv J., Bulin C.K., Zhao R.C. Recovering iron and beneficiating niobium from rough niobium concentrate by magnetization roast–magnetic separation process // Hydrometallurgy China. 2013. Vol. 32. No. 2. P. 75.
26. Jiang M., Sun T.C., Kou J., Ji Y., Xu Y. Distribution behavior of niobium in process of coal-based direct reduction roasting of Nb-bearing iron concentrates // Xiyou Jinshu/Chinese Journal of Rare Metals. 2011. Vol. 35. No. 5. P. 731–735. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2011.05.019>
27. Жучков В.И., Андреев Н.А., Заякин О.В., Островский Я.И., Афанасьев В.И. Состав и служебные характеристики хромовых ферросплавов // Сталь. 2013. № 5. С. 36–37.
28. Гасик М.И., Гладких В.А., Жданов А.В., Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И., Овчарук А.Н. Расчетное определение ценности марганцеворудного сырья // Электрометаллургия. 2009. № 1. С. 32–34.
29. Смирнов Л.А., Жучков В.И., Заякин О.В., Михайлова Л.Ю. Комплексные ванадийсодержащие ферросплавы // Металлург. 2020. № 12. С. 91–95.
30. Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И., Заякин О.В., Жучков В.И. Использование российского хроморудного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // Сталь. 2008. № 4. С. 32–36.
31. 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 // Metalurgija. 2019. Vol. 58. No. 3–4. P. 291–294.
32. Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И., Есенжулов А.Б., Островский Я.И. Основные направления переработки бедного отечественного хроморудного сырья // Электрометаллургия. 2008. № 5. С. 18–21.
33. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 13–16.
34. Андреев Н.А., Жучков В.И., Заякин О.В. Изучение плотности хромсодержащих ферросплавов // Электрометаллургия. 2012. № 6. С. 15–16.
35. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the produc-
- Participation and School for Young Scientists “FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development”. 2019, pp. 29–45.
19. Morozova L.N., Bayanova T.B., Bazai A.V., Lyalina L.M., Serov P.A., Borisenko E.S., Kunakkuzin E.L. Rare metal pegmatites of the Kolmozero lithium deposit in the Arctic region of the Baltic shield: New geochronological data. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2017, no. 1 (9), pp. 43–52. (In Russ.).
20. Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor: geology, technology, economics. *EKO*. 2014, no. 2 (476), pp. 36–44. (In Russ.).
21. *New Mineral and Raw Metallurgical Complexes in Russia (Brief Overview)*. Mashkovtsev G.A. ed. Moscow: VIMS, 2007, 44 p. (In Russ.).
22. Nechaev A.V., Smirnov A.V., Sibilev A.S., etc. Hydrometallurgical processing of columbite concentrate from the Zashikhinsky deposit. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2017, vol. 18, no. 2, pp. 81–88. (In Russ.).
23. Maslov A.A., Ostval'd R.V., Shagalov V.V., Maslova E.S., Gorenyuk Yu.S. *Chemical Technology of Niobium and Tantalum*. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010, 97 p. (In Russ.).
24. Liu M.D., You Z.X., Peng Z.W. Enrichment of rare earth and niobium from a REE–Nb–Fe associated ore via reductive roasting followed by magnetic separation. *JOM*. 2016, vol. 68, no. 2, pp. 567–576. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1679-y>
25. Xv J., Bulin C.K., Zhao R.C. Recovering iron and beneficiating niobium from rough niobium concentrate by magnetization roast–magnetic separation process. *Hydrometallurgy China*. 2013, vol. 32, no. 2, pp. 75.
26. Jiang M., Sun T.C., Kou J., Ji Y., Xu Y. Distribution behavior of niobium in process of coal-based direct reduction roasting of Nb-bearing iron concentrates. *Xiyou Jinshu/Chinese Journal of Rare Metals*. 2011, vol. 35, no. 5, p. 731–735. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2011.05.019>
27. Zhuchkov V.I., Andreev N.A., Zayakin O.V., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I. Composition and performance of chromium-bearing ferroalloys. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 5, pp. 306–308. <https://doi.org/10.3103/S0967091213050240>
28. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Ovcharuk A.N. Calculation of the value of manganese ore raw materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009, vol. 2009, no. 8, pp. 756–758. <https://doi.org/10.1134/S0036029509080175>
29. Smirnov L.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Complex vanadium – containing ferroalloys. *Metallurgist*. 2021, vol. 64, no. 11–12, pp. 1249–1255. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01112-1>
30. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Russian chromium ore in smelting high-carbon ferrochrome at OAO SZF. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 315–317. <https://doi.org/10.3103/S096709120804013X>
31. 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. *Metalurgija*. 2019, vol. 58, no. 3–4, pp. 291–294.
32. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I. Main trends in the processing of poor chrome ore raw materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 8, pp. 709–712. <https://doi.org/10.1134/S0036029508080132>
33. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-bearing ferroalloys in steel. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 5, pp. 416–418. <https://doi.org/10.3103/S0967091207050038>
34. Andreev N.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Density of chromium-containing ferroalloys. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, vol. 2013, no. 6, pp. 418–419. <https://doi.org/10.1134/S0036029513060025>
35. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the pro-

- tion of refined ferrochrome // *Metalurgija*. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529–532.
36. Жучков В.И., Заякин О.В., Михайлова Л.Ю. Физическая химия и технология в металлургии ферросплавов. Екатеринбург: ООО «Альфа Принт», 2021. 272 с.
 37. 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.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
 38. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reactions and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database. Pori: Outokumpu research OY, 2002. 268 p.
 39. Заякин О.В., Михайлова Л.Ю., Уполовникова А.Г. и др. Термодинамический анализ силикотермического получения ферросплавов из ниобийсодержащих концентратов // Труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»: «ТЕХНОГЕН-2021». Екатеринбург: УрО РАН, 2021. С. 202–205.
 - duction of refined ferrochrome. *Metalurgija*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 529–532.
 36. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. *Physical Chemistry and Technology in Ferroalloy Metallurgy*. Yekaterinburg: Al'fa Print, 2021, 272 p. (In Russ.).
 37. 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.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
 38. Roine A. *Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reactions and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database*. Pori: Outokumpu research OY, 2002, 268 p.
 39. Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu., Upolovnikova A.G., etc. Thermodynamic analysis of silicothermal production of ferroalloys from niobium-containing concentrates. In: *Proceedings of the Congress with Int. Participation and Conf. of Young Scientists "Fundamental Research and Applied Development of Processing and Disposal of Technogenic Formations": "TECHNOGEN-2021"*. Yekaterinburg: UrB RAS, 2021, pp. 202–205. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Владимир Иванович Жучков, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: ntm2000@mail.ru

Олег Вадимович Заякин, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: zferro@mail.ru

Александр Владимирович Сычев, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: ntm2000@mail.ru

Людмила Юрьевна Михайлова, к.т.н., научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: ferrostal@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leopol'd I. Leont'ev, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS", Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
E-mail: ntm2000@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
E-mail: zferro@mail.ru

Aleksandr V. Sychev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
E-mail: ntm2000@mail.ru

Lyudmila Yu. Mikhailova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
E-mail: ferrostal@bk.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Л. И. Леонтьев – общее руководство, постановка задач исследования.
В. И. Жучков – формирование основной концепции и методических подходов.
О. В. Заякин – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.
А. В. Сычев – теоретический анализ, проведение расчетов, анализ результатов исследований, формирование выводов.
Л. Ю. Михайлова – обзор литературы, сбор, систематизация и обработка данных для проведения исследования, подготовка текста.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

L. I. Leont'ev – general guidance, setting research objectives.
V. I. Zhuchkov – the formation of the main concept and methodological approaches.
O. V. Zayakin – scientific guidance, analysis of research results, revision of the text, correction of conclusions.
A. V. Sychev – theoretical analysis, calculations, analysis of research results, drawing conclusions.
L. Yu. Mikhailova – literature review, collection, systematization and processing of data for the study, preparation of the text.

Поступила в редакцию 01.12.2021
После доработки 08.12.2021
Принята к публикации 09.12.2021

Received 01.12.2021
Revised 08.12.2021
Accepted 09.12.2021