

Научная статья

УДК 669.245:66.046.516

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-76-90

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО РЕНИЙ-НИКЕЛЕВОЙ ЛИГАТУРЫ ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

П.Г. Мин¹, В.Е. Вадеев¹, Д.А. Чемов¹, Р.В. Санкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлена технология производства рений-никелевой лигатуры, предназначенной для легирования литейных жаропрочных никелевых сплавов. Описана подробная технологическая схема производства лигатуры – от подготовки исходных материалов до выпуска готовой продукции. Показано, что предварительный вакуумный отжиг обеспечивает спекание частиц и эффективную дегазацию порошка рения. Разработанные режимы отжига порошка и плавки лигатуры в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом позволяют минимизировать содержание газов, обеспечить равномерное распределение компонентов в объеме слитка и повысить выход годного металла. Разработанная лигатура успешно применяется при изготовлении монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: рений, лигатура, механические свойства, длительная прочность, литейные жаропрочные сплавы, монокристалл, ВЖМ4, ЖС32, авиационные лопатки, газотурбинные двигатели

Для цитирования: Мин П.Г., Вадеев В.Е., Чемов Д.А., Санкин Р.В. Разработка и внедрение в производство рений-никелевой лигатуры для легирования монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 76–90. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-76-90.

Scientific article

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A RHENIUM-NICKEL ALLOY FOR ALLOYING MONOCRYSTALLINE HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOYS

P.G. Min¹, V.E. Vadeev¹, D.A. Chemov¹, R.V. Sankin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the technology of production of rhenium-nickel alloying, intended for alloying of casting high-temperature nickel alloys. A detailed technological scheme of production of alloying from preparation of initial materials to the release of finished products is described. It is shown that preliminary vacuum annealing of rhenium powder provides sintering of particles and effective degassing. The developed modes of powder annealing and alloying in a vacuum arc furnace with a non-consumable electrode allow to minimize the gas content, ensure uniform distribution of components inside the ingot, and increase the yield of the metal. The developed alloying is successfully used in the manufacture of single-crystal heat-resistant nickel alloys.

Keywords: rhenium, alloying, mechanical properties, long-term strength, cast heat-resistant alloys, single crystal, VZhM4, ZhS32, aircraft blades, gas turbine engines

For citation: Min P.G., Vadeev V.E., Chemov D.A., Sankin R.V. Development and implementation of a rhenium-nickel alloy for alloying monocrystalline high-temperature nickel alloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 76–90. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-76-90.

Введение

В 1980-х гг. рений произвел «революцию» в области теории жаропрочности [1]. Растворяясь в матрице никелевого сплава, он резко затормаживает диффузионные процессы, тем самым увеличивает работоспособность материала в составе изделия [2]. Разработанный во Всесоюзном институте авиационных материалов (в настоящее время – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) первый в мире монокристаллический жаропрочный ренийсодержащий никелевый сплав марки ЖС32 позволил значительно повысить эксплуатационные характеристики турбинных лопаток авиационных двигателей [3].

С тех пор развитие авиационной промышленности всегда сопровождалось разработкой новых литейных жаропрочных ренийсодержащих никелевых сплавов. Ведущие зарубежные компании разработали несколько десятков ренийсодержащих материалов серий CMSX, Rene, PWA, TMS и др. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ также создана серия монокристаллических жаропрочных рений- и рений-рутенийсодержащих никелевых сплавов (ВЖМ4, ВЖМ5, ВЖМ6, ВЖМ8, ВЖМ10 и др.) для применения в новейших российских двигателях ПД-8, ПД-14, ПД-35 и др., работоспособных при температуре газа перед турбиной >1800 К [4–11]. Это привело к устойчивому увеличению спроса на металлический рений. В настоящее время ~80 % (~40 из 62 т) мировой добычи рения направляется на производство данных материалов, что подчеркивает значимость этого уникального элемента в современной авиации (рис. 1) [12–20].

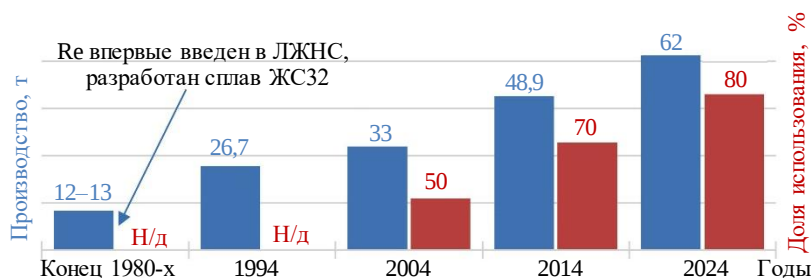


Рис. 1. Мировое производство и доля использования Re для изготовления литейных жаропрочных никелевых сплавов (ЛЖНС): н/д – данные отсутствуют

Чистота исходных шихтовых материалов (по содержанию вредных примесей и газов) является одним из ключевых факторов, влияющих на качество получаемых монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Образующиеся с участием примесных элементов оксиды, нитриды, карбонитриды, сульфиды и др. являются источниками гетерогенного зарождения «паразитных» зерен при направленной кристаллизации монокристаллических отливок и концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин в процессе эксплуатации материала [21–25]. Поэтому примесные элементы, присутствуя даже в очень малых количествах, резко снижают прочностные характеристики и стабильность свойств монокристаллов и, как следствие, надежность и ресурс работы материала лопаток в составе изделий.

Рений, являясь тугоплавким тяжелым металлом [26, 27], склонен к ликвации и образованию топологически плотноупакованных фаз в процессе производства и эксплуатации монокристаллических жаропрочных высоколегированных никелевых сплавов [25]. Введение рения в виде высококачественной (с низким содержанием примесей и газов) лигатуры с никелем при вакуумной индукционной плавке данных материалов

позволит обеспечить его высокую усвояемость, стабильность химического состава и структуры сплава.

Цель работы – разработка технологии получения высококачественной рений-никелевой лигатуры с пониженным содержанием вредных примесей и газов и внедрение ее в серийное производство современных монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов.

Материалы и методы

Для изготовления рений-никелевой лигатуры марки РеНи-1 применяли карбонильную никелевую дробь марки ДНК-0 и металлический порошок рения марки Ре-0.

Рениевый порошок уплотняли методом прессования на гидравлическом прессе под давлением до 588,4 кН (60 тс) с применением пластификатора на глицериновом связующем.

Отжиг рениевого порошка осуществляли в вакуумной камерной электропечи, способной нагревать материал до 2500 °С при остаточном давлении $\sim 0,0013$ Па (10^{-5} мм рт. ст.).

Выплавку лигатуры проводили в атмосфере инертного газа (аргона) в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом, разработанной специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Установка предназначена для изготовления лигатур тугоплавких и активных металлов, необходимых при производстве жаропрочных сплавов. Печь оборудована эффективной системой очистки и осушения аргона, включающей фильтры и адсорбент на основе молекулярных сит. Для откачки воздуха использовали форвакуумный насос, обеспечивающий давление до 0,133 Па (10^{-3} мм рт. ст.).

Сплав ЖС32 выплавляли в вакуумной индукционной печи. Литье заготовок образцов с монокристаллической структурой ориентации <001> выполняли на установке направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем (алюминием).

Химический состав сплава ЖС32, рений-никелевой лигатуры и рениевого порошка определяли с использованием следующих методов:

- микрорентгеноспектральный анализ – согласно ГОСТ 22309–2015;
- оптико-эмиссионная спектрометрия с искровым возбуждением пробы – в соответствии с МИ 1.2.061–2014;
- масс-спектрометрия – в соответствии с МИ 1.2.052–2013, МИ 1.2.053–2013 и МИ 1.2.054–2013;
- инфракрасная спектрометрия для определения углерода, серы и кислорода – согласно ГОСТ 24018.7–91, ГОСТ 24018.8–91 и ГОСТ 17745–90 соответственно;
- кондуктометрия для определения азота – согласно ГОСТ 17745–920.

Испытания на длительную прочность сплава ЖС32, полученного методом вакуумно-индукционной выплавки, проводили на монокристаллических образцах с кристаллографической ориентацией <001> без термической обработки согласно ГОСТ 10145–81.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Рений является редким рассеянным элементом с высокими значениями температуры плавления и плотности, а его кларковое число составляет всего $7 \cdot 10^{-8}$ % [26]. Промышленное извлечение рения осуществляется попутно при переработке медных, молибденовых и урановых руд, что является сложным и трудозатратным процессом [27, 28]. При получении литейных жаропрочных никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи рений добавляют в виде компактного материала – металлических

штабиков (в России) или пеллет (в США). При производстве обоих видов материалов из порошка металлического (чернового) рения получают предварительно спрессованную заготовку, которую затем спекают, удаляя газы и вредные примеси [29]. Однако традиционные способы ввода рения в расплав имеют недостатки. Высокая температура плавления ($\sim 3182^\circ\text{C}$) [30] и плотность ($21,02\text{ г/см}^3$) [31] затрудняют растворение рения и распределение в объеме расплава, поскольку температура плавки никелевых сплавов обычно составляет $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$ [21], а плотность никеля равна $8,9\text{ г/см}^3$ [30].

Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ предложили решение данной проблемы – введение рения в виде лигатуры, которая включает 75 % (по массе) рения и характеризуется соотношением содержаний (% (атомн.)) рения и никеля 1:1 (рис. 2). Такое соотношение улучшает условия растворения рения в никелевом расплаве, выравнивает его распределение по объему, что стабилизирует химический состав, физические и механические свойства сплава [32, 33].

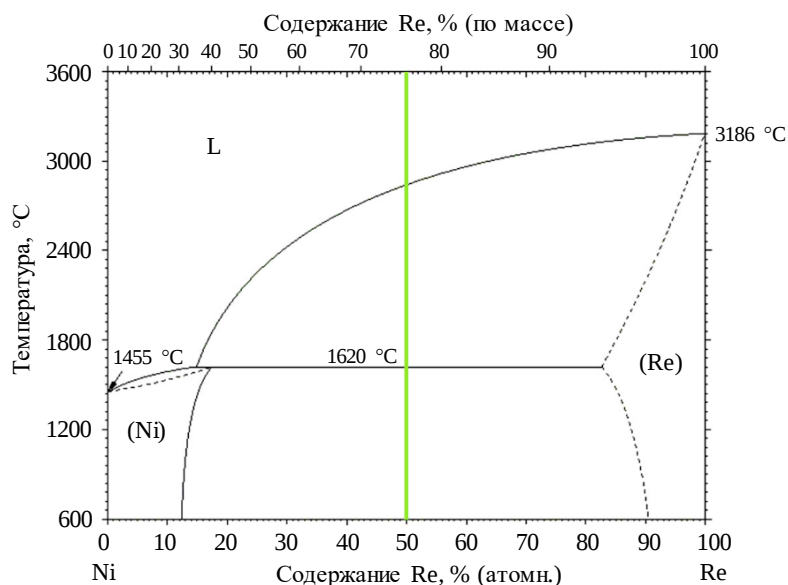


Рис. 2. Диаграмма состояния системы Re–Ni [34]

При плавке рениевого порошка в вакуумной дуговой печи в момент наведения дуги на материал образуется область с высоким давлением, из-за чего мелкие частицы рассеиваются по объему камеры. В результате происходят неизбежные потери металла, загрязняются важные компоненты установки, такие как смотровые стекла, вакуумные насосы и механизмы управления плавкой. Для предотвращения рассеивания частиц перед началом процесса плавки рениевый порошок следует подвергать компактированию.

Эксперимент по прессованию рениевого порошка в таблетки на прессе с усилием до $588,4\text{ кН}$ (60 тс) с применением пластификатора со связующим на основе глицерина не обеспечил ожидаемых результатов. Установлено, что достигаемого уровня давления недостаточно для получения плотной таблетки. Это связано с тем, что слой оксида Re_2O_7 , влага и газы на поверхности частиц порошка препятствуют его компактированию [26]. В производстве штабиков или пеллет прессование осуществляется при более высоком давлении, при этом получают только предварительно спрессованную заготовку, а ее дальнейшее уплотнение проходит в две стадии при спекании в атмосфере водорода при температурах $1100\text{--}1200$ и $2400\text{--}2850^\circ\text{C}$ [25, 26]. Из данных табл. 1 [27] следует, что при таких температурах оксиды удаляются из рениевого порошка за счет сублимации.

Таблица 1

Свойства оксидов рения [27]

Свойства	Значения свойств для оксида рения		
	ReO ₂	ReO ₃	Re ₂ O ₇
Температура, °С:			
плавления	1202	>500	300,3
кипения	1064	543,4	360,3
сублимации	1363	614	—
Плотность, г/см ³	11,4	7,2	6,14

Оксид Re₂O₇ возгоняется при низкой температуре [26], которая снижается с уменьшением давления (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость температуры кипения Re₂O₇ от давления [26]

Температура, °С	214	230	238	250	265	276	295	300	310	325	340	350	360
Давление, Па	133	400	667	1453	3533	6666	17998	21331	27998	41598	59862	79993	94792

Удаление оксидов, влаги и газов с поверхности частиц порошка происходит при вакуумном отжиге, температура и время выдержки которого схожи с аналогичными параметрами спекания металлических заготовок (штабика и пеллет). Основными изменяемыми параметрами при разработке режима вакуумного отжига являлись температура, давление и время. Процесс нагрева выполняли поэтапно, постепенно увеличивая температуру до момента повышения давления, после чего поддерживали заданную температуру до последующего снижения давления. Давление увеличивалось из-за выделения газов, оксидов и влаги из порошка, по достижении рабочей температуры выдержки давление снижалось, что подтверждало полную дегазацию порошка. Исследована зависимость содержания газов в рениевом порошке от параметров вакуумного отжига (рис. 3). На графике приведены значения содержания кислорода в рениевом штабике, технические требования к штабику и порошку в России [35], а также к пеллетам в США [36].

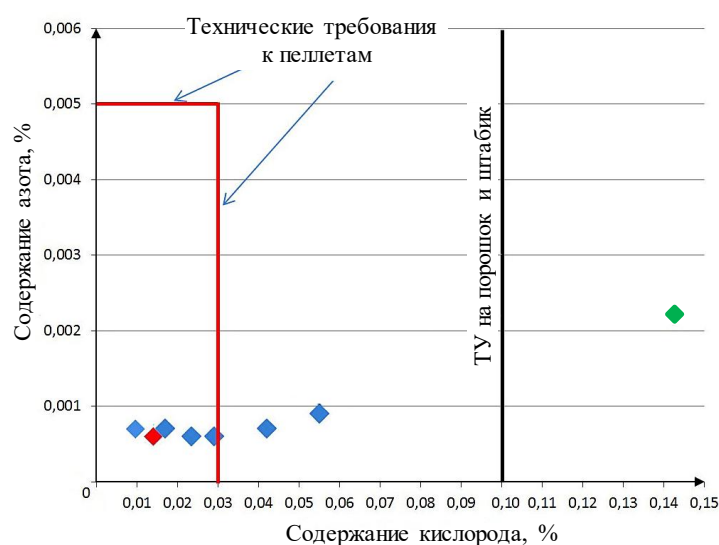


Рис. 3. Содержание кислорода и азота в металлическом рении до термической обработки (◆), после отжига по оптимальному (◆) и различным режимам (◆)

При оптимальных значениях температуры и времени отжига достигнуто снижение содержания азота в 3,5 раза в сравнении с исходным порошком, а кислорода – более чем в 10 раз. Увеличение времени выдержки и температуры не снижает содержания газов. На поверхности частиц порошка находится адсорбированный кислород, поэтому оценку газонасыщения целесообразно проводить по содержанию азота.

В процессе вакуумного отжига порошка по оптимальному режиму обнаружен эффект спекания частиц, благодаря чему исключена необходимость в предварительном формировании таблеток из порошка. Устранение поверхностных оксидов, влаги и газов способствует увеличению контактируемой поверхности чистых металлических частиц и их сцеплению друг с другом, таким образом достигается эффект спекания [37]. Несмотря на отсутствие полного слияния частиц в единый монолит, данная степень спекания достаточна для технологичной плавки ренийевого порошка (рис. 4) с никелем в вакуумной дуговой печи.



Рис. 4. Спеченный ренийевый порошок

По результатам проведенных исследований определена оптимальная технологическая схема производства рений-никелевой лигатуры – от добычи сырья до получения готового продукта. Для сравнения на рис. 5 дополнительно приведены схемы производства металлического штабика и пеллет.



Рис. 5. Технологическая схема получения компактных материалов из рения

Отожженный ренийевый порошок сплавляют с никелем в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом. При этом в процессе плавки внутри рабочей камеры может происходить распыление мелкодисперсных частиц, которые образуют нагар на смотровых стеклах и снижают выход годного металла. Кроме того, при проведении плавки на нижнюю часть электрода (рис. 6, *а*) попадают брызги жидкого металла (рис. 6, *б*), что вызывает его эрозию и нестабильное горение дуги, затрудняя управление процессом плавки.



Рис. 6. Электроды в исходном состоянии перед плавкой (*а*), до (*б*) и после (*в*) отработки параметров плавки

Для решения указанных проблем проведены эксперименты по оптимизации базовых технологических параметров выплавки – давления аргона в камере печи и силы электрического тока, подаваемого на электрод. Помимо улучшения процесса плавки, необходимо обеспечить равномерный состав лигатуры, для чего слиток многократно переплавляли. Проведено 12 плавов с различными параметрами и количеством последовательных переплавов слитка (табл. 3).

Таблица 3

Технологические параметры опробованных режимов выплавки

Условный номер режима	Количество переплавов	Давление аргона	Сила тока	Выход годного, %
1–6	3	Пониженное или атмосферное	Повышенная или пониженная	99,70–99,90
7	5	Повышенное	Оптимальная	99,98
8	3		Пониженная	99,81
9	3		Повышенная	99,81
10–11	5	Повышенное	Оптимальная	99,85
12 (оптимальный)	5	Оптимальное	Оптимальная	100,00

Установлено, что при давлении аргона, меньшем или равном атмосферному, происходили интенсивные выбросы расплава, попадающие на поверхность электрода, вызывая его эрозию, что также отрицательно влияло на выход годного металла. При повышенном давлении аргона брызги металла на электрод не попадали (рис. 6, *в*), сокращалось количество осаждаемого нагара на смотровых стеклах, обеспечивался стабильно высокий выход годного металла. При пониженных значениях силы тока замедлялся процесс плавления шихты, увеличивалась продолжительность плавки. При повышенных значениях данного параметра происходило интенсивное покрытие смотровых стекол нагаром, из-за чего отсутствовала возможность полноценно наблюдать и регулировать процесс плавки.

Установленный оптимальный режим плавки рений-никелевой лигатуры в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом обеспечивает выход годного, равный 100 %, и низкую эрозию электрода. Для подтверждения равномерности распределения основных компонентов по объему слитка после каждого переплава по данному режиму отобрано по пять проб для определения химического состава. Данные химического анализа представлены на рис. 7.

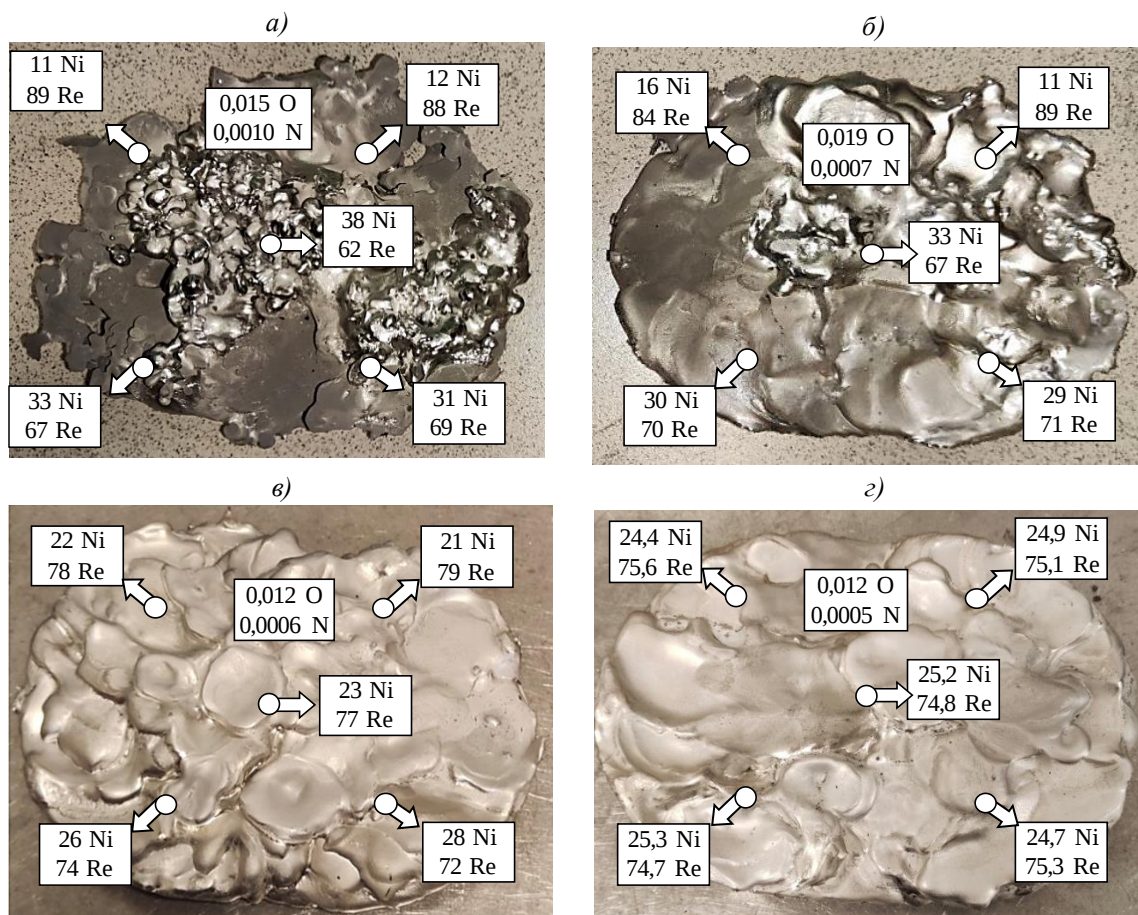


Рис. 7. Химический состав (% (по массе)) и внешний вид слитка, выплавленного по оптимальному режиму, после второго (а), третьего (б), четвертого (в) и пятого (з) переплавов

После пятого переплава химический состав рений-никелевой лигатуры совпадает с расчетным (75 и 25 % (по массе) Re и Ni соответственно) во всем объеме, а слиток стал плотным и однородным. Содержание азота после каждого переплава снижается и в результате составляет 0,0005 % (по массе). В табл. 4 приведено сравнение содержания вредных примесей в рениевом порошке и лигатуре.

Таблица 4

**Сравнение содержания вредных примесей
в рениевом порошке марки Re-0 и лигатуре марки ReNi-1**

Материал	Содержание элементов, % (по массе)									
	P	Zn	Te	Tl	Bi	Pb	Fe	B	O	N
Рениевый порошок	0,0022	0,0010	0,00003	0,00050	0,00020	0,00020	0,0120	0,0120	0,142	0,0022
Лигатура	<0,0005	<0,0005	<0,00001	0,00009	<0,00001	<0,00001	0,0076	<0,0001	0,012*	0,0005*

* Нестандартные образцы для анализа, фактическое содержание должно быть меньше.

За счет высокотемпературного вакуумного отжига ($>1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и воздействия электрической дуги ($>3300\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит дополнительная очистка рения от большинства примесей и газов, поэтому содержание фосфора, бора, железа, примесей цветных металлов, а также кислорода и азота в лигатуре значительно меньше, чем в рениевом порошке.

Микроструктура рений-никелевой лигатуры (рис. 8, а) состоит из твердого раствора рения с никелем (рис. 8, б, в) и равномерно распределенных по всему объему частиц фазы α -Ni (рис. 8, з, д). Это свидетельствует о высоком качестве изготовленной лигатуры. Согласно диаграмме состояния системы Re-Ni [34], при равном содержании (% (атомн.)) обоих металлов вероятно выделение твердой фазы β -рения, однако микрорентгеноспектральный анализ при увеличении $\times 100$ мкм подтвердил отсутствие данной фазы.

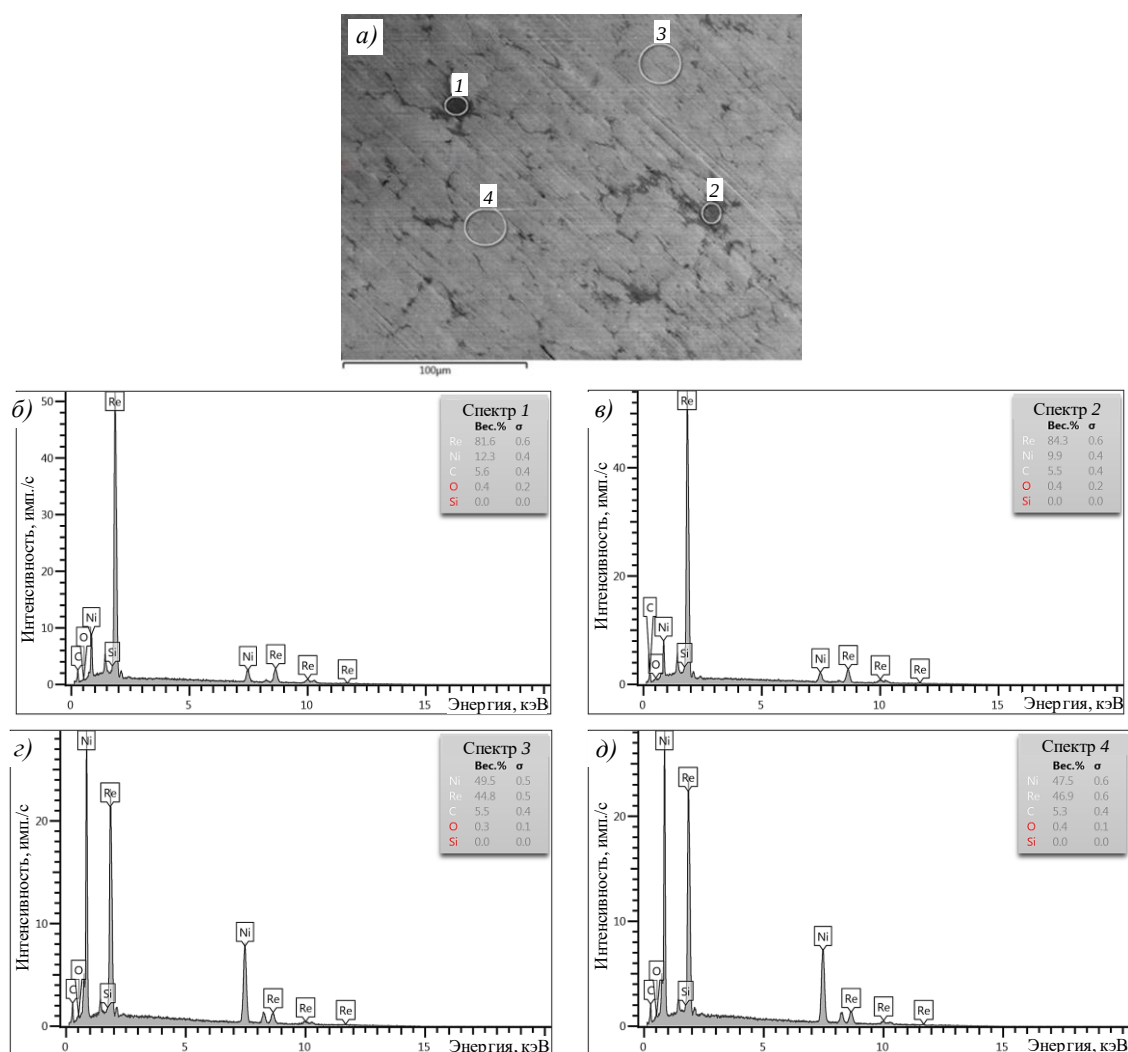


Рис. 8. Микроструктура (а) и результаты качественного микрорентгеноспектрального анализа лигатуры марки ReNi-1 (б–д)

В результате проведенных экспериментов разработан способ получения рений-никелевой лигатуры. Процесс состоит из следующих операций: предварительный вакуумный отжиг рениевого порошка, последующая плавка с никелем в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом, переворачивание слитка и серия повторных переплавок [38].

Изготовленная рений-никелевая лигатура марки РеНи-1 применена в производстве литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС32. Выплавку проводили в вакуумной индукционной печи по стандартной серийной технологии с заменой традиционно применяемого рениевого штабика на лигатуру.

Получено высокое усвоение рения, введенного в виде лигатуры (содержание Re превышает расчетное значение на 0,12 %), по химическому составу сплав полностью соответствует требованиям ТУ. Для подтверждения уровня свойств полученного материала требованиям ТУ и паспортным значениям монокристаллические образцы из данного сплава испытаны на длительную прочность.

Среднее время до разрушения сплава ЖС32 при 975 °С и $\sigma = 294$ МПа составляет 83 ч, при 1000 °С и $\sigma = 275$ МПа достигает 57 ч, что полностью соответствует требованиям ТУ. При этом полученные результаты значительно превышают норму по ТУ (40 ч). Графики изменения длительной прочности сплава на базах испытания 100 и 500 ч при температурах 1000 и 1100 °С и паспортном уровне напряжения представлены на рис. 9.

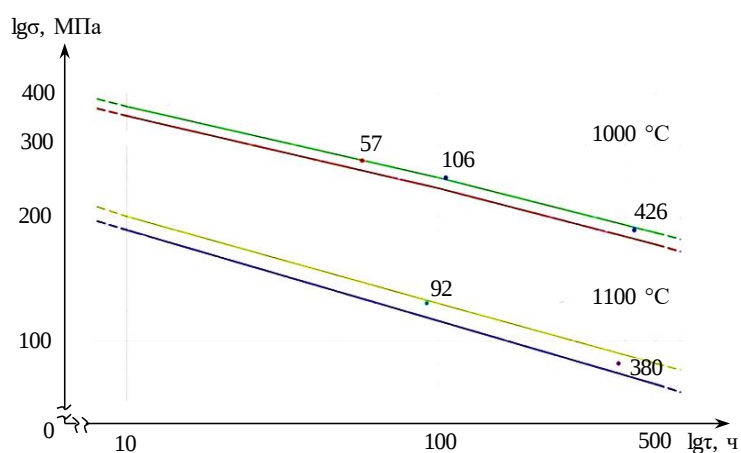


Рис. 9. Средние (—, —) и минимальные (---, ---) значения длительной прочности сплава ЖС32, выплавленного с применением разработанной лигатуры

Долговечность сплава при температуре 1000 °С на базах испытаний 100 и 500 ч (при напряжении 250 и 186 МПа соответственно) составляет 106 и 426 ч. При температуре 1100 °С на базах испытаний 100 и 500 ч (при напряжении 123,6 и 88 МПа соответственно) достигает 92 и 380 ч. Испытания на долговечность показали полное соответствие результатов паспортным характеристикам, что свидетельствует о высоком качестве сплава и применяемой рений-никелевой лигатуры марки РеНи-1.

На основании результатов испытаний сплава ЖС32 лигатура марки РеНи-1 одобрена в качестве шихтового материала при серийном производстве литейных жаропрочных никелевых сплавов. Более 300 кг изготовленной лигатуры применено при вакуумной индукционной плавке монокристаллического жаропрочного рений-рутенийсодержащего никелевого сплава ВЖМ4. Отмечено пониженное содержание примесей железа, фосфора, марганца, висмута, свинца и высокое усвоение рения. Химический состав и механические свойства сплава, полученного с применением лигатуры марки РеНи-1, полностью соответствуют установленным техническим требованиям.

Заключения

В производстве современных жаропрочных никелевых сплавов необходимо применять высококачественные шихтовые материалы, содержащие небольшое

количество вредных примесей и газов. Тугоплавкие и тяжелые металлы, в частности рений, целесообразно вводить в плавку в виде лигатур с никелем, поскольку лигатура и никелевый расплав имеют схожие физические параметры.

Разработанный метод производства высококачественной рений-никелевой лигатуры марки РеНи-1 предусматривает два ключевых этапа: вакуумный отжиг рениевого порошка с целью его дегазации и компактирования и последующую плавку с никелем в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом для получения однородного слитка с пониженным содержанием вредных примесей и газов.

Опытно-промышленное применение разработанной лигатуры реализовано при получении монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС32. Установлено, что химический состав и жаропрочность сплава соответствуют действующим ТУ и паспортным характеристикам. Рений-никелевая лигатура марки РеНи-1 успешно применяется в производстве монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: литье заготовок под образцы проведено под руководством Е.М. Висик; микроструктурные исследования – Р.М. Дворецковым; определение содержания основных легирующих элементов, примесей и газов – П.С. Петровым, А.В. Алексеевым и Т.Н. Пахомкиной; испытания механических свойств – под руководством С.А. Голынца.

Список источников

1. Кишкин С.Т., Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы для турбинных лопаток // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 48–58.
2. Сидоров В.В., Подкопаева Л.А., Мин П.Г. Применение ренийсодержащей лигатуры при выплавке монокристаллических высокожаропрочных никелевых сплавов // Металлург. 2013. № 6. С. 77–81.
3. Сплав на основе никеля: пат. 1157865 СССР; заявл. 01.06.84; опубл. 10.06.97.
4. Логунов А.В., Быков Ю.Г. Проблемы проектирования и производства высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД: в 2 кн. М.: Наука и технологии, 2023. Кн. 2. Технология и производство. 640 с.
5. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Мин М.Г. Разработка и освоение в производстве нового монокристаллического высокожаропрочного никелевого сплава для литья турбинных лопаток перспективного двигателя ПД-8 // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 3–17. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
6. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 30–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
7. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 3–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
8. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). С. 30–41. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.

9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Сурова В.А. Особенности высокоградиентной направленной кристаллизации и оборудование для литья монокристаллических образцов и турбинных лопаток из жаропрочных сплавов, содержащих рений // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 194–205.
10. Мин П.Г., Горюнов А.В., Вадеев В.Е. Современные жаропрочные никелевые сплавы и эффективные ресурсосберегающие технологии их изготовления // Технология металлов. 2014. № 8. С. 12–23.
11. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Развитие технологий и оборудования для получения лопаток горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурой // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). С. 3–14. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.
12. Giamei A.F., Anton D.L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: Effects on microstructure // Metallurgical transactions. 1985. Vol. 16. P. 1997–2005.
13. Blavette D., Caron P., Khan T. An atom probe investigation of the role rhenium additions in improving creep resistance of Ni-base superalloys // Scripta metallurgica. 1986. Vol. 20. No. 10. P. 1395–1400.
14. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 5–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-5-16.
15. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
16. Хрящев И.И., Данилов Д.В., Логунов А.В. Разработка экономнолегированного никелевого жаропрочного сплава для рабочих лопаток газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 205–218.
17. Anderson C., Taylor P., Anderson C. Extractive Metallurgy of Rhenium A Review // Minerals & Metallurgical Processing. 2013. Vol. 30. P. 59–73. DOI: 10.1007/BF03402342.
18. Mineral commodity summaries. Reston: U.S. Geological Survey, 2020. 200 p. DOI: 10.3133/mcs2020.
19. Касиков А.Г., Петрова А.М. Рециклинг рения. М.: РИОР; ИНФРА-М, 2014. 95 с. DOI: 10.12737/3285.
20. Игнатович А.С. Извлечение меди и рения из растворов аммиачного выщелачивания медных некондиционных концентратов: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2021. 118 с.
21. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2016. 368 с.
22. Каблов Д.Е. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и повышение их эксплуатационных свойств: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2012. 17 с.
23. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и его влияние на их эксплуатационные свойства // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 1. С. 8–12.
24. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys // High Temperature Materials and Processes. 2005. Vol. 24. No. 2. P. 101–109.
25. Логунов А.В., Михайлов А.М., Румянцева С.Б. Определение температурно-временных параметров растворения тугоплавких элементов в жидком расплаве с целью дальнейшего совершенствования технологии вакуумно-индукционной выплавки никелевых жаропрочных сплавов с применением комплекса лигатур // Специальная электрометаллургия. 2024. № 3. С. 2–13.
26. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М: Металлургия, 1991. 432 с.
27. Петухов О.Ф., Санакулов К.С., Курбанов М.А., Шарафутдинов У.З. Рений. Навои, 2020. 397 с.

28. Venatovskij I.V. Study of the geotechnical conditions of uranium deposits of Uzbekistan during exploration work // Uranium in situ leaching: proceedings of a Technical Committee Meeting (Vienna, 5–8 October, 1992). Vienna: International Atomic Energy Agency, 1993. P. 95–103.
29. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М., Костылев А.И. Технология рения. М.: Галлея-Принт, 2015. 324 с.
30. Коровин С.С., Букин В.И., Федоров П.И., Резник А.М. Редкие и рассеянные элементы. Химия и технологии: в 3 т. / под общ. ред. С.С. Коровина. М.: МИСИС, 2003. Т. 3. С. 375.
31. Раков Э.Г., Трошкина И.Д. Рений // Химическая энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. Н.С. Зефирова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. Т. 4. Полимерные – Трипсин. С. 639.
32. Мин П.Г., Пителин Н.С., Вадеев В.Е. Разработка технологии получения гафний-никелевой лигатуры в вакуумной дуговой печи для легирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // Технология металлов. 2022. № 7. С. 30–39.
33. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Пителин Н.С. Технология производства лигатур тугоплавких металлов и их опробование при выплавке литейных жаропрочных никелевых сплавов // Металлург. 2022. № 11. С. 88–94.
34. Лякишев Н.П., Банных О.А., Рохлин Л.Л. и др. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2. С. 885–889.
35. ТУ 48-19-92–88. Рений металлический водородного восстановления. М., 1988. 21 с.
36. Rhenium (Superalloy grade). No 8112 9131. MMTA Consolidated Regulations. URL: <http://www.mmta.co.uk> (дата обращения: 11.11.2025).
37. Bradbury S. Powder Metallurgy Equipment Manual. Preston: Metal Powder Industries Federation, 1986. P. 113.
38. Способ изготовления лигатур в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым электродом: пат. 2734220 Рос. Федерация; заявл. 27.02.20; опубл. 13.10.20.

References

1. Kishkin S.T., Kablov E.N. Casting heat-resistant alloys for turbine blades. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS; VIAM, 2002, pp. 48–58.
2. Sidorov V.V., Podkopaeva L.A., Min P.G. Use of rhenium-containing master alloy in smelting single-crystal high-heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2013, no. 6, pp. 77–81.
3. *Nickel-based alloy*: pat. 1157865 USSR; appl. 01.06.84; publ. 10.06.97.
4. Logunov A.V., Bykov Yu.G. *Problems of design and production of high-temperature cast blades for aircraft gas turbine engines*: in 2 books. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2023, book 2: Technology and Production, 640 p.
5. Min P.G., Vadeev V.E., Min M.G. Development and implementation in production of the new single-crystal high-temperature nickel alloy for casting of gas turbine blades for the prospective engine PD-8. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 3–17. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
6. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 30–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
7. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 3–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
8. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 30–41. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.

9. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Surova V.A. Features of high-gradient directional solidification and equipment for casting single-crystal samples and turbine blades from heat-resistant alloys containing rhenium. *Casting heat-resistant alloys. Effect of S.T. Kishkin*. Moscow: Nauka, 2006, pp. 194–205.
10. Min P.G., Goryunov A.V., Vadeev V.E. Modern heat-resistant nickel alloys and efficient resource-saving technologies for their manufacture. *Tekhnologiya metallov*, 2014, no. 8, pp. 12–23.
11. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. Development of technologies and equipment for producing blades of the hot path of gas turbine engines from superalloys with directional and single-crystal structure. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 3–14. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.
12. Giamei A.F., Anton D.L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: Effects on microstructure. *Metallurgical transactions*, 1985, vol. 16, pp. 1997–2005.
13. Blavette D., Caron P., Khan T. An atom probe investigation of the role rhenium additions in improving creep resistance of Ni-base superalloys. *Scripta metallurgica*, 1986, vol. 20, no. 10, pp. 1395–1400.
14. Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Elyutin E.S. Rhenium in single crystal nickel-based superalloys for gas turbine engine blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 5–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-5-16.
15. Ospennikova O.G. Tendencies of development of heat-resistant nickel alloys of low density with polycrystalline and single-crystal structures (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
16. Khryashchev I.I., Danilov D.V., Logunov A.V. Development of an economically alloyed nickel heat-resistant alloy for gas turbine blades. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 205–218.
17. Anderson C., Taylor P., Anderson C. Extractive Metallurgy of Rhenium A Review. *Minerals & Metallurgical Processing*, 2013, vol. 30, pp. 59–73. DOI: 10.1007/BF03402342.
18. *Mineral commodity summaries*. Reston: U.S. Geological Survey, 2020, 200 p. DOI: 10.3133/mcs2020.
19. Kasikov A.G., Petrova A.M. *Rhenium Recycling*. Moscow: RIOR; INFRA-M, 2014, 95 p. DOI: 10.12737/3285.
20. Ignatovich A.S. *Extraction of Copper and Rhenium from Ammonia Leaching Solutions of Substandard Copper Concentrates*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). St. Petersburg, 2021, 118 p.
21. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E. *Metallurgy of Casting Heat-Resistant Alloys: Technology and Equipment*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2016, 368 p.
22. Kablov D.E. *Patterns of nitrogen behavior during the production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and improving their performance properties*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2012, 17 p.
23. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Patterns of nitrogen behavior during the production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and its influence on their performance properties. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2014, no. 1, pp. 8–12.
24. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys. *High Temperature Materials and Processes*, 2005, vol. 24, no. 2, pp. 101–109.
25. Logunov A.V., Mikhailov A.M., Rumyantseva S.B. Determination of temperature-time parameters of dissolution of refractory elements in a liquid melt for the purpose of further improvement of technology of vacuum-induction smelting of nickel heat-resistant alloys using a complex ligature. *Special electrometallurgy*, 2024, no. 3, pp. 2–13.
26. Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgy of Rare Metals: A Textbook for Universities*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgy, 1991, 432 p.
27. Petukhov O.F., Sanakulov K.S., Kurbanov M.A., Sharafutdinov U.Z. *Reniy*. Navoi, 2020, 397 p.
28. Venatovskij I.V. Study of the geotechnical conditions of uranium deposits of Uzbekistan during exploration work. *Uranium in situ leaching: proceedings of a Technical Committee Meeting (Vienna, 5–8 October, 1992)*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1993, pp. 95–103.

29. Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M., Kostylev A.I. *Rhenium Technology*. Moscow: Galley-Print, 2015, 324 p.
30. Korovin S.S., Bukin V.I., Fedorov P.I., Reznik A.M. *Rare and Trace Elements. Chemistry and Technology*: in 3 vols. Ed. S.S. Korovin. Moscow: MISiS, 2003, vol. 3, p. 375.
31. Rakov E.G., Troshkina I.D. Rhenium. *Chemical Encyclopedia*: in 5 vols. Ed. N.S. Zefirov. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1995. Vol. 4. Polymer – Trypsin, p. 639.
32. Min P.G., Pitelin N.S., Vadeev V.E. Development of a Technology for Obtaining a Hafnium-Nickel Master Alloy in a Vacuum Arc Furnace for Alloying Heat-Resistant Nickel Casting Alloys. *Tekhnologiya metallov*, 2022, no. 7, pp. 30–39.
33. Min P.G., Vadeev V.E., Pitelin N.S. Technology for the Production of Refractory Metal Master Alloys and Their Testing in the Melting of Heat-Resistant Nickel Casting Alloys. *Metallurg*, 2022, no. 11, pp. 88–94.
34. Lyakishev N.P., Bannykh O.A., Rokhlin L.L. et al. *Phase diagrams of binary metallic systems: a handbook* in 3 vols. Moscow: Mashinostroenie, 1997, vol. 2, pp. 885–889.
35. TU 48-19-92–88. *Rhenium metal hydrogen reduction*. Moscow, 1988, 21 p.
36. *Rhenium (Superalloy grade)*. No 8112 9131. MMTA Consolidated Regulations. Available at: <http://www.mmta.co.uk> (accessed: November 11, 2025).
37. Bradbury S. *Powder Metallurgy Equipment Manual*. Preston: Metal Powder Industries Federation, 1986, p. 113.
38. *Method for producing ligatures in a vacuum arc furnace with a non-consumable electrode*: pat. 2734220 Rus. Federation; appl. 27.02.20; publ. 13.10.20.

Информация об авторах

Мин Павел Георгиевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вадеев Виталий Евгеньевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чемов Дмитрий Александрович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Санкин Роман Вадимович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel G. Min, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaliy E. Vadeev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitriy A. Chemov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman V. Sankin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.03.2026.

The article was submitted 18.03.2026; approved and accepted for publication after reviewing 23.03.2026.