

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-37-48

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИИ ПРИПОЯ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОИМЕННОГО СОЧЕТАНИЯ СПЛАВОВ ЭП975 И ВКНА-25 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

И.А. Галушка¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, М.Д. Пантелеев¹, С.Д. Зотов¹

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

Аннотация. Проведена разработка никельсодержащего припоя ВПр56 для высокотемпературной диффузионной пайки биметаллических узлов конструкции типа «блиск» из жаропрочных сплавов ЭП975 и ВКНА-25. Изучено влияние легирующих элементов (Ti, Nb, B) на технологические характеристики припоя: температуру плавления, растекаемость, равномерность шва и склонность к эрозии основного металла. Применены методы планирования экспериментов и регрессионного анализа для подбора состава. Установлено, что припой ВПр56 соответствует требованиям к соединениям газотурбинных двигателей (ГТД).

Ключевые слова: пайка, диффузионная пайка, припой, жаропрочные никелевые сплавы, конструкция ротора ГТД, биметаллическая конструкция типа «блиск»

Для цитирования: Галушка И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Пантелеев М.Д., Зотов С.Д. Оптимизация композиции припоя для соединения разноименного сочетания сплавов ЭП975 и ВКНА-25 с использованием современных вычислительных систем // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 37–48. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-37-48.

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE SOLDER COMPOSITION FOR JOINING DISSIMILAR EP975 AND VKNA-25 ALLOYS USING MODERN COMPUTATIONAL SYSTEMS

I.A. Galushka¹, A.N. Afanasiev-Khodikin¹, M.D. Panteleev¹, S.D. Zotov¹

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

Abstract. A nickel-based brazing metal designated VPr56 was developed for high-temperature diffusion brazing of bimetallic blisk-type components made from heat-resistant nickel alloys EP975 (disk) and VKNA-25 (blade). The study examined the influence of alloying elements (Ti, Nb, B) on the brazing metal's key processing characteristics: melting temperature, wettability, joint uniformity, and susceptibility to erosion of the base metal. Experimental design and regression analysis were applied to optimize the composition. It was shown that VPr56 meets the requirements for joints of gas turbine engines (GTE) joints.

Keywords: brazing, a diffusive brazing, brazing alloy, nickel super alloys, rotor design GTE, a bimetallic «blisk» design

For citation: Galushka I.A., Afanasiev-Khodikin A.N., Panteleev M.D., Zotov S.D. Optimization of the solder composition for joining dissimilar EP975 and VKNA-25 alloys using modern computational systems. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 37–48. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-37-48.

Введение

Повышение ресурса и энергоэффективности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) остается одной из приоритетных задач в области материаловедения и машиностроения [1, 2].

Среди направлений повышения эффективности конструкций турбин особое внимание уделяется снижению массы ротора, особенно рабочего колеса, которое работает в условиях высоких температур, циклических нагрузок и агрессивной среды. Концепция биметаллической конструкции типа «блиск» (от англ. bladed disk), в которой диск и лопатки объединены в единый узел, рассматривается как перспективная альтернатива традиционным разъемным соединениям [3, 4].

Применение неразъемного соединения позволяет отказаться от замковых конструкций типа «елочка», традиционно используемых в серийных ГТД. Такие соединения, несмотря на проверенную надежность, приводят к увеличению массы обода, усложнению технологии сборки, появлению контактных напряжений и необходимости дополнительной фиксации лопаток [5].

Согласно ряду исследовательских и проектных расчетов, применение монолитной конструкции «блиск» позволяет снизить массу рабочего колеса до 30 % и повысить его ресурсоемкость за счет более равномерного распределения нагрузки [6–8].

Особый интерес представляет реализация конструкции из разноименных материалов: монокристаллического интерметаллида ВКНА-25 – в качестве материала лопаток, и деформируемого жаропрочного сплава ЭП975 – для диска. Такое сочетание обеспечивает рациональное распределение термонагрузки и механических усилий, однако требует применения специальных методов соединения, так как традиционные технологии сварки вызывают образование горячих трещин и грубых литых структур [9, 10].

В рамках существующих подходов можно выделить четыре основные технологии получения неразъемного соединения лопаток с диском:

- горячее изостатическое прессование (ГИП);
- диффузионная сварка;
- линейная сварка трением;
- высокотемпературная диффузионная пайка.

Каждая из технологий имеет определенные ограничения. Метод ГИП требует создания герметичной капсулы сложной формы и исключает возможность ремонта изделия после наработки.

Линейная сварка трением предъявляет высокие требования к геометрической форме соединения и сложна в реализации при серийном производстве.

Диффузионная сварка эффективна, но требует точной обработки сопрягаемых поверхностей и значительного усилия прижатия, что затрудняет соединение тонкостенных монокристаллических элементов.

В отличие от указанных методов, высокотемпературная диффузионная пайка обладает рядом технологических преимуществ [11–15]:

- может выполняться в стандартных вакуумных печах сопротивления без необходимости приобретения дорогостоящего оборудования;
- допускается соединение изделий со сложной геометрической формой и высокоточной установкой лопаток в пазы диска;
- не требуется значительных сборочных усилий и допускается ремонтпригодность – перепайка изношенных лопаток возможна без разрушения основного диска;
- обеспечивает плавный переход в химическом составе шва при соблюдении режима гомогенизационной термической обработки (ГТО), исключая образование хрупких боридов и карбидных фаз.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Припой и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования рассматривались серийные и опытные высокотемпературные припои на основе никеля, в качестве материалов для изготовления конструкции типа «блиск» – жаропрочный деформируемый сплав ЭП975 и литейный интерметаллидный сплав ВКНА-25.

Выплавку исходного металла сплавов проводили в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в вакуумной индукционной установке ВИАМ 2002 в тигле емкостью 10 кг.

Для изучения изменения химического состава и содержания газов в металле во время плавки использовали специальные стальные пробницы, с помощью которых брали пробы путем погружения пробницы в расплав без нарушения вакуума.

Разливку металла проводили в стальную трубу с внутренним диаметром 70 мм. Для получения качественной поверхности заготовки обрабатывали на токарном станке. Из нижней плотной части полученной заготовки вырезали шайбу для контроля итогового химического состава и содержания газов.

Химический состав определяли на образцах, вырезанных из слитков сплавов ЭП975 и ВКНА-25 с применением волно-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Определение содержания примесей (C, S) выполняли на газоанализаторе по ГОСТ 24018.7–91 и ГОСТ 24018.8–91, а примесей (O, N) – на газоанализаторе по ГОСТ 22598–93 и ГОСТ 17745–90.

Состав припоев определяли по МИ 1.2.052–2013, МИ 1.2.053–2013 и МИ 1.2.054–2013 на стружке, отобранной с образцов сплавов.

Получение цилиндрических образцов осуществляли на литейной установке УВНК-9А. Вакуумная установка УВНК-9А предназначена для литья деталей длиной до 300 мм (лопаток ГТД и ГТУ) сложной конфигурации с монокристаллической структурой методом направленной кристаллизации с применением жидкометаллического охладителя.

За основу припоя выбрана система Ni–Co–Cr–Al, которая дополнительно легирована элементами-депрессантами, такими как Ti, Nb и В. Предварительный выбор состава припоя оценивали по основным температурным характеристикам припоя. Выплавку опытных составов припоев производили в атмосфере аргона в электродуговой печи с нерасходуемым электродом. Масса полученных слитков припоев составляла по 80 г каждый.

Выплавленные слитки подвергали обточке на токарном станке для снятия литейной корки. Для удобства использования слитки припоев размалывали до размера частиц не более 400 мкм с использованием планетарной мельницы МПП-1. Измельчаемый материал в процессе работы мельницы подвергается множеству соударений как с мелющими телами, так и со стенками самого барабана. После размолва порошки припоев подвергали магнитной сепарации для удаления частиц припоев, загрязненных железом с мелющих тел.

Для получения припоя в виде порошка использовали метод атомизации заготовки припоя.

Для определения технологических характеристик припоев использовали два типа образцов: плоский – цилиндрический образец и образец с клиновым зазором (рис. 1).

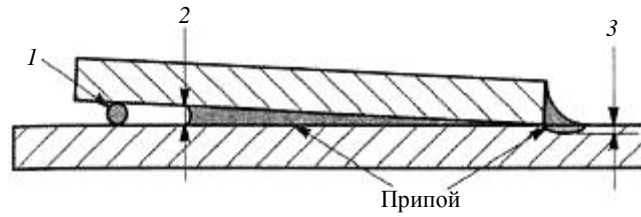


Рис. 1. Схема образца для определения величины диффузионного взаимодействия: 1 – проволока диаметром 0,3 мм; 2 – максимально заполняемый зазор; 3 – величина эрозионной активности

На плоских образцах определяли площадь растекания, угол смачиваемости и эрозионную активность припоев по отношению к сплавам ВКНА-25 и ЭП975. Предварительно поверхность образцов доводили до одинаковой степени шероховатости. Припой укладывали в виде навески диаметром 5 мм и высотой 3 мм на шлифованные образцы диаметром 16 мм из сплавов ЭП975 и ВКНА-25. Угол смачиваемости определяли металлографическим методом на микрошлифе по величине угла, образованного растекшейся каплей припоя и подложкой (по ГОСТ 23904–79). Величину эрозионной активности определяли по величине растворенного припоем слоя основного материала в месте укладки припоя.

Микроструктуру образцов всех плавок исследовали на оптическом микроскопе при увеличении $\times(50-500)$ по ГОСТ 20486–75.

Исследование основных характеристик микроструктуры (морфология, распределение упрочняющей γ' -фазы, карбидов, нитридов и др.) проводили на растровом электронном микроскопе согласно ММ 1.2.013–2002. На растровом электронном микроскопе при помощи дополнительного режима проведен также микрорентгеноспектральный анализ.

Механические испытания проводили на сплошных цилиндрических образцах с диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм. Образцы изготавливали из цилиндрических заготовок $\varnothing 14$ мм по ГОСТ 10145–81, ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84 (рис. 2).

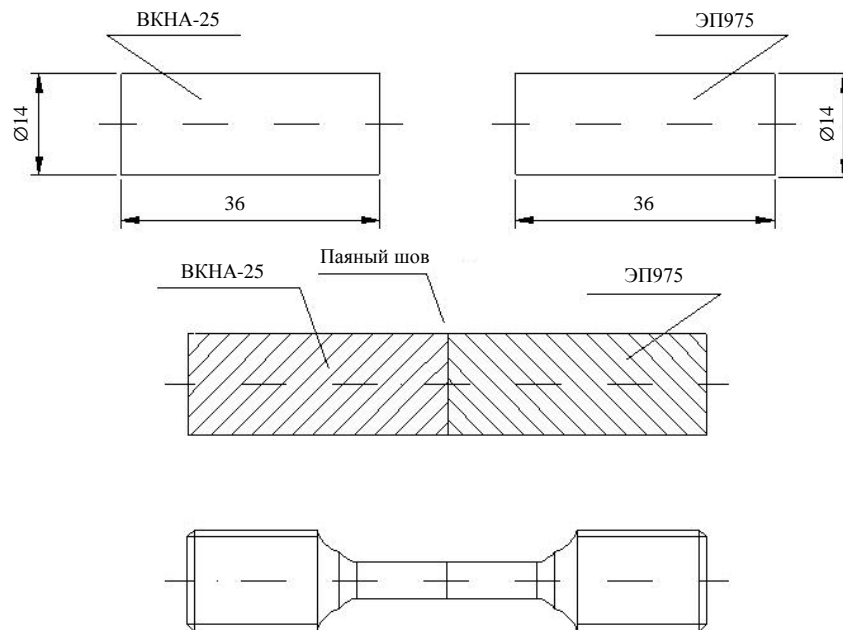


Рис. 2. Эскиз модельных образцов стыкового типа из сплавов ЭП975 и ВКНА-25 для оценки прочности паяного соединения

Испытания на кратковременную прочность (σ_b) при температурах 20 и 900 °С проводили на машине ИР5113 в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84.

Испытания на длительную прочность осуществляли по нормам технических условий на сплав при температуре 975 °С и напряжении 255 МПа на компьютеризированных стендах в соответствии с требованиями ГОСТ 10145–81 и ГОСТ 3248–81.

Для повышения качества модели и поиска наилучших решений для изменяемых параметров, отвечающих за содержание Ti, Nb и В, принято решение перейти к квадратичной форме модели.

При определении оптимальных значений легирования на основе регрессионных моделей произведен поиск таких значений методом поиска по сетке с учетом степени желательности от 0 до 1. Значения откликов определены экспериментально.

Результаты и обсуждение

На основании результатов определения температуры полного расплавления (T_L) и температуры начала плавления (T_S) припоев выявлена область химических составов припоев, позволяющих добиться необходимого качества паяного соединения. В выбранную область попали припой со следующим диапазоном составов, % (по массе): (8,0–15,0) Со; 10,0 Cr; (0–4,0) Al; (0–2,5) Ti; (0–3,0) Nb; 2,0 В.

Для более детального изучения влияния основных элементов-депрессантов припоя на технологические характеристики проведены опыты с более узким диапазоном легирования трех факторов: депрессанта (1,4–2,7) В и γ' -образующих элементов (1,8–4,0) Nb и (1,3–3,7) Ti.

В качестве основных параметров, влияющих на данные факторы исследованы:

- площадь растекания на металлической подложке $S_{\text{раст}} = 10\text{--}186 \text{ мм}^2$;
- величина эрозионной активности по отношению к соединяемым материалам: 2,5–35,0 мкм – для сплава ВКНА-25; 11,0–90,5 мкм – для сплава ЭП975;
- температура ликвидус $T_L = 1190\text{--}1290 \text{ °С}$;
- температура солидус $T_S = 1120\text{--}1168 \text{ °С}$;
- интервал плавления припоя $\Delta T = 37\text{--}150 \text{ °С}$.

В результате проведения серии экспериментов с переменными значениями факторов составлены регрессионные модели (табл. 1).

Таблица 1

Линейные уравнения со степенью значимости $p < 0,5$, полученные в результате обработки результатов эксперимента

Отклик	Зависимость	R^2
Площадь растекания $S_{\text{раст}}$, мм ²	$Y_1 = -128,05 + 31,54\text{Ti} + 88,36\text{В}$	0,640
Эрозия сплава ВКНА-25, мкм	$Y_2 = -5,9 - 3,35\text{Nb} + 17,39\text{В}$	0,740
Эрозия сплава ЭП975, мкм	$Y_3 = 6,09 - 6,35\text{Ti} + 36,4\text{В}$	0,375
Температура ликвидус T_L , °С	$Y_4 = 1357,17 - 0,33\text{Ti} - 0,9\text{В}$	0,928
Температура солидус T_S , °С	$Y_5 = 1154,4 - 0,49\text{Ti} + 0,279\text{В}$	0,314
Интервал плавления припоя ΔT , °С	$Y_6 = 242,76 - 1,96\text{Ti} - 74,62\text{В}$	0,691

Результаты расчета коэффициента детерминации R^2 показали, что полученные уравнения регрессии, описывающие величину эрозионного взаимодействия со сплавом ЭП975 и температуру солидус припоя, объясняют <40 % дисперсии результативного признака [17–20].

На рис. 3 показаны диаграммы Парето для оценки значимости коэффициентов различных технологических параметров припоя до и после исключения незначимых коэффициентов применительно к квадратичному уравнению на уровне степени значимости

$p < 0,05$ [17–19]. Обозначим линейные коэффициенты вводимых элементов $Ti(L)$, $Nb(L)$, $B(L)$, квадратичные – $Ti(Q)$, $Nb(Q)$, $B(Q)$, а парные взаимодействия коэффициентов цифрами, где 1 – Ti, 2 – Nb, 3 – B.



Рис. 3. Диаграммы Парето для оценки значимости коэффициентов регрессии с учетом всех влияющих коэффициентов и после исключения коэффициентов со степенью значимости $p < 0,05$ параметров: *a* – площадь растекания на металлической подложке $S_{раст}$; *б* – эрозия сплава ВКНА-25; *в* – эрозия сплава ЭП975; *г* – температура ликвидус T_L ; *д* – температура солидус T_S ; *е* – интервал плавления припоя ΔT

По результатам исследования видно, что из основных компонентов статистически значимыми оказались:

- для площади растекания – $B(L)$, $Ti(L)$, $B(Q)$, $Nb(Q)$, $Ti(Q)$;
- для величины эрозии сплава ВКНА-25 – $B(L)$, $Nb(L)$, $B(Q)$, $Nb(Q)$;
- для величины эрозии сплава ЭП975 – $B(L)$, $Ti(L)$, $B(Q)$, $Nb(Q)$, $Ti(Q)$;
- для температуры ликвидус – $B(L)$, $Ti(L)$, $B(Q)$, $Ti(Q)$;
- для температуры солидус – $B(L)$, $Ti(L)$, $Ti(Q)$;
- для интервала плавления припоя – $B(L)$, $B(Q)$, $Ti(Q)$.

Итоговые уравнения принимают следующий вид – табл. 2.

Таблица 2

Квадратичные регрессионные зависимости со степенью значимости $p < 0,05$

Зависимость	R^2
$Y_1 = -683,02 + 175,514Ti - 28,61Ti^2 - 1,29Nb^2 + 507,25B - 104,58B^2$	0,97
$Y_2 = -15,37 - 47,27Nb + 7,31Nb^2 + 87,89B - 16,83B^2$	0,95
$Y_3 = -360,26 + 88,08Ti - 18,88Ti^2 - 0,41Nb^2 + 313,11B - 69,83B^2$	0,92
$Y_4 = -1531,14 + 53,51Ti - 7,92Ti^2 - 156,54B - 23,38B^2$	0,99
$Y_5 = 1023,63 + 101,59Ti - 22,70Ti^2 + 11,50B$	0,87
$Y_6 = 400,68 + 0,16Ti^2 - 243,77B + 42,40B^2$	0,76

С использованием методов статистического анализа на основе полученных результатов построены графики зависимостей технологических характеристик припоев от содержания Ti, Nb и В (рис. 4).

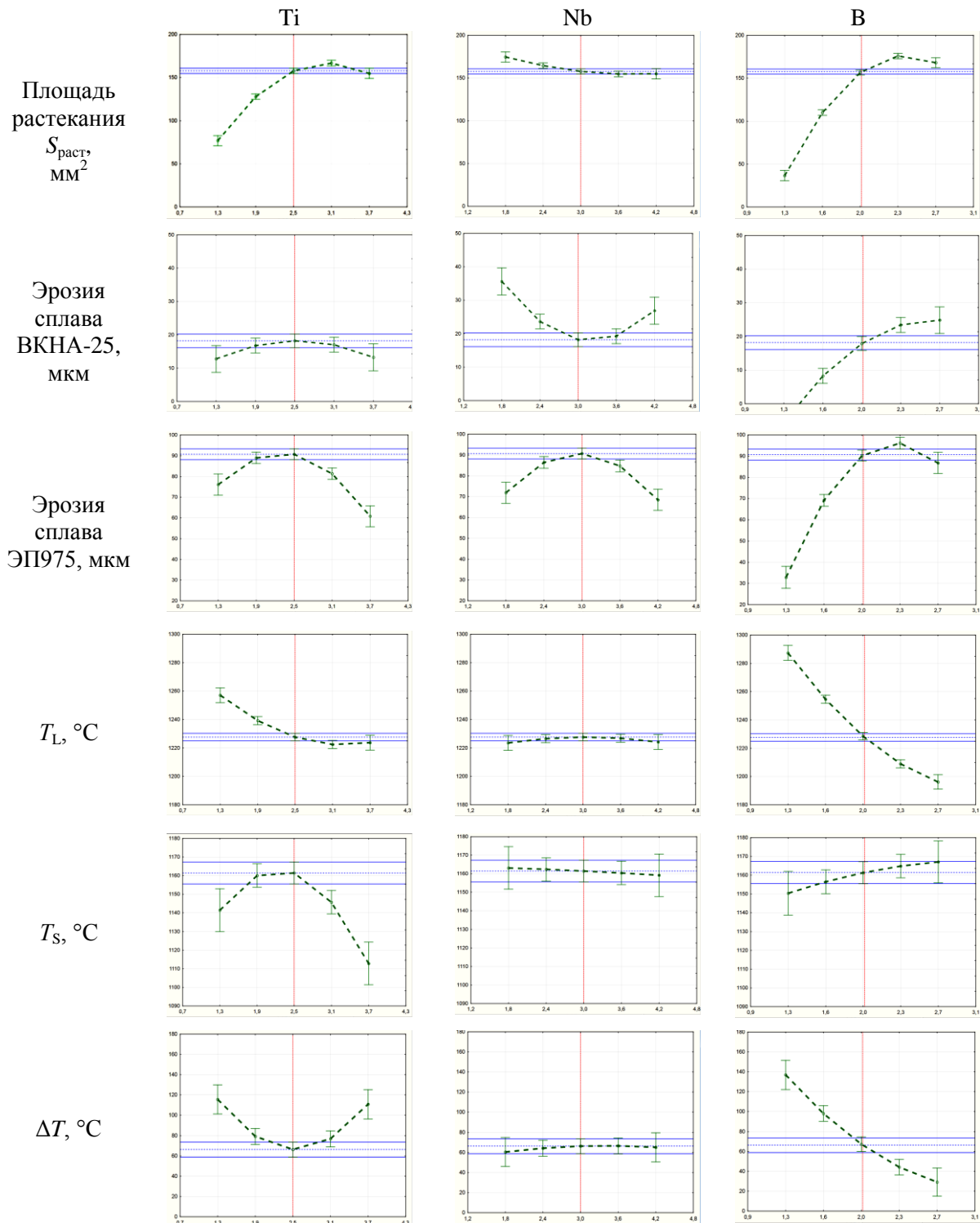


Рис. 4. Зависимости откликов от факторов

На основании проведенного поиска найдена комбинация элементов-депрессантов припоя следующего состава, % (по массе): 1,91 Ti, 3,21 Nb и 2,64 В.

На практике выплавка припоя точечного химического состава не представляется возможной, а отклонения химического состава припоя могут вызвать существенное отклонение технологических характеристик припоя от оптимальных (рис. 5). В связи с этим определены пределы содержания элементов-депрессантов припоя, сохраняющие выбранные технологические характеристики припоя в пределах $\pm 5\%$.

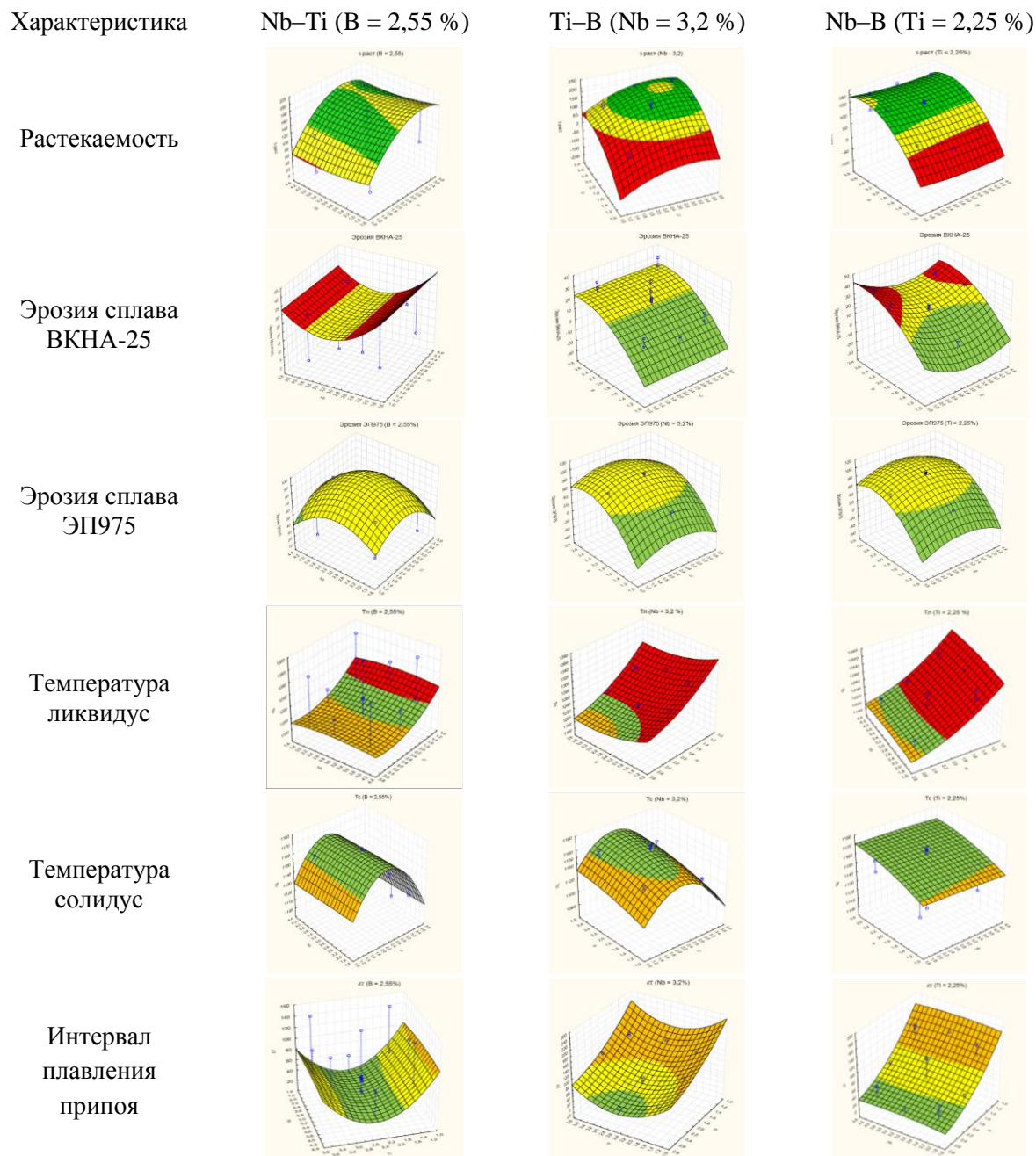


Рис. 5. Поверхности отклика технологических характеристик припоя в исследованном диапазоне концентраций

В результате проделанной работы получен припой с оптимальными технологическими характеристиками для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25. Припою присвоена марка ВПр56. Технологические характеристики данного припоя указаны в табл. 3.

Таблица 3

Технологические характеристики припоя ВПр56 для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25

Характеристика	Значения характеристик для				
	оптимального состава (расчетные)	пределов легирования (расчетные)		реального состава	
		min	max	расчетные	экспериментальные
Растекаемость $S_{\text{раст}}$, мм ²	140	141,5	172	163	150
Эрозия сплава ВКНА-25, мкм	22,95	23,5	26,4	24	30
Эрозия сплава ЭП975, мкм	87,5	92,8	78	92,5	90
Ликвидус T_L , °С	1210	1220	1193	1205	1210
Солидус T_S , °С	1165	1162	1162	1167	1170
Интервал плавления припоя ΔT , °С	45	58	31	38	40

Заключения

На основании проведенных исследований определена основа для припоя, предназначенного для получения соединения из сплавов ВКНА-25 и ЭП975. Содержание элементов-депрессантов в составе припоя определяли с применением методов планирования эксперимента. Результаты, полученные при исследовании технологических характеристик припоя, использовали для изучения зависимостей влияния легирующих элементов припоя и последующего построения регрессионных моделей.

Наибольшее влияние на растекаемость $S_{\text{раст}}$ и температурные характеристики припоя оказывает титан. Его введение до 3,1 % (по массе) увеличивает значения $S_{\text{раст}}$, дальнейшее увеличение его содержания лишь незначительно снижает эту характеристику. Эрозионная активность по отношению к сплаву ВКНА-25 достаточно небольшая, что позволяет исключить коэффициенты, отвечающие за титан из регрессионного уравнения. Несмотря на оказываемое воздействие на сплав ЭП975, введение титана в интервале 1,3–2,5 % (по массе) повышает эрозионную активность на 16,5 %. Наибольший интерес представляет влияние титана на температурные характеристики при его введении до 2,5 % (по массе). На этом участке наблюдается уменьшение температуры полного расплавления и снижение интервала плавления, что позволяет ограничить введение других элементов, негативно влияющих на соединяемые материалы.

Ниобий, вводимый в состав припоя, оказывает наиболее значимое влияние на эрозионную активность с соединяемыми материалами. При его введении до 3,0 % (по массе) наиболее существенно снижается эрозионная активность со сплавом ВКНА-25 и незначительно увеличивается эрозионная активность к сплаву ЭП975. Кроме того, ниобий во всем интервале введения планомерно уменьшает $S_{\text{раст}}$ припоя. Влияние изменения содержания ниобия на температурные характеристики статистически не значимо, поэтому коэффициенты, отвечающие за его содержание, отсутствуют.

Бор оказывает наибольшее влияние на технологические характеристики исследуемых опытных плавок припоя. Введение бора до 2,3 % (по массе) приводит к увеличению площади растекания и существенному росту эрозионного взаимодействия с соединяемыми материалами. Однако небольшое добавление бора приводит к существенному снижению температуры полного расплавления припоя и уменьшению интервала плавления.

С применением методов вычислительного материаловедения и цифрового моделирования проведена оптимизация состава припоя и интервала варьирования элементов-депрессантов в составе припоя. Технологические характеристики припоя с оптимизированным химическим составом соответствуют расчетным с выбранным отклонением от них, что свидетельствует о хорошей работоспособности полученной модели. Припою для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25 в равноименном сочетании присвоена марка ВПр56.

Список источников

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: в 5 т. М.: Машиностроение, 2007. Т. 1: Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. С. 7–17.
2. Reed R.C. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2006. P. 363–372.
3. Furrer D., Fecht H. Ni-Based Superalloys for Turbine Discs // JOM. 1999. Vol. 51. P. 14–17. DOI: s11837-999-0005-y.
4. Klocke F., Schmitt R., Zeis M. et al. Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture // Procedia CIRP. 2015. Vol. 35. P. 67–72. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.052.
5. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: в 5 т. М.: Машиностроение, 2007. Т. 2: Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. 368 с.
6. Лунев А.Н., Курылев Д.В. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей // Фундаментальные исследования. 2016. № 6-1. С. 78–82. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40375> (дата обращения: 20.06.2025).
7. Магерамова Л.А., Васильев Б.Е. Биметаллические блиски турбин с бандажированными лопатками для газотурбинных двигателей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 6. С. 143–156.
8. Yuan J., Scarpa F., Titurus B. et al. Efficient computational techniques for mistuning analysis of bladed discs: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 87. Part A. P. 71–90.
9. 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: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
10. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). С. 15–24. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1974. 248 с.
12. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
13. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Технология высокотемпературной диффузионной пайки конструкции типа «блиск» из разноименных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). С. 26–37. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-26-37.
14. Оспенникова О.Г., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Исследование особенностей формирования микроструктуры паяного соединения разноименных никелевых жаропрочных сплавов, выполненных сложнoleгированным многокомпонентным припоем // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-3-12.
15. Zhou X., Huang Y., Chen Y. et al. Brazing of Ni-based single crystal superalloy with high carbon content γ layer // Applied Surface Science. 2020. Vol. 514. Art. 145936. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145936.

16. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
17. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
18. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 339 с.
19. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. М.: Высшая школа, 1984. 248 с.
20. Петрушин Н.В., Висик Е.М., Елютин Е.С. Усовершенствование химического состава и структуры литейного жаропрочного никелевого сплава с малой плотностью. Часть 2 // *Труды ВИАМ*. 2021. № 4 (98). С. 3–15. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-3-15.

References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratsky V.L. *Gas turbine engines. Fundamentals of designing aircraft engines and power plants*: in 5 vols. Moscow: Mashinostroenie, 2007, vol. 1: General information. Main parameters and requirements. Design and power schemes, pp. 7–17.
2. Reed R.C. *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2006, pp. 363–372.
3. Furrer D., Fecht H. Ni-Based Superalloys for Turbine Discs. *JOM*, 1999, vol. 51, pp. 14–17. DOI: s11837-999-0005-y.
4. Klocke F., Schmitt R., Zeis M. et al. Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 35, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.052.
5. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratsky V.L. *Gas Turbine Engines. Fundamentals of Designing Aircraft Engines and Power Plants*: in 5 vols. Moscow: Mashinostroenie, 2007, vol. 2: Compressors. Combustion Chambers. Afterburners. Turbines. Exhaust Devices, 368 p.
6. Lunev A.N., Kurylev D.V. Review of Progressive Methods for Manufacturing Axial Monowheels of Aircraft Gas Turbine Engines. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 6-1, pp. 78–82. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40375> (accessed: June 20, 2025).
7. Magerramova L.A., Vasiliev B.E. Bimetallic turbine blades with banded blades for gas turbine engines. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 6, pp. 143–156.
8. Yuan J., Scarpa F., Titurus B. et al. Efficient computational techniques for mistuning analysis of bladed discs: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 87, part A, pp. 71–90.
9. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev 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: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
10. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 15–24. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Lashko N.F., Lashko S.V. *Questions of theory and technology of soldering*. Saratov: Publ. house Saratovsk. Univ., 1974, 248 p.
12. Petrunin I.E., Markova I.Yu., Ekatoва A.S. *Metallurgy of soldering*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p.
13. Ospennikova O.G., Lukin V.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Technology of the high temperature diffusive brazing of a bimetallic «blisk» design. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), pp. 26–37. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-26-37.

14. Ospennikova O.G., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Investigation of a brazed joint microstructure formation, made of dissimilar nickel super alloys and the complex brazing alloy. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-3-12.
15. Zhou X., Huang Y., Chen Y. et al. Brazing of Ni-based single crystal superalloy with high carbon content γ layer. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 514, art. 145936. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145936.
16. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
17. Kendall M.J., Stewart A. *Multivariate Statistical Analysis and Time Series*. Moscow: Nauka, 1976, 736 p.
18. Nalimov V.V., Chernova N.A. *Statistical Methods for Designing Extreme Experiments*. Moscow: Nauka, 1965, 339 p.
19. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Mathematical Statistics*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1984, 248 p.
20. Petrushin N.V., Visik E.M., Elyutin E.S. Improvement of the chemical composition and structure of castable nickel-base superalloy with low density. Part 2. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), pp. 3–15. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-3-15.

Информация об авторах

Галушка Игорь Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Афанасьев-Ходыкин Александр Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пантелеев Михаил Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зотов Святослав Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor A. Galushka, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander N. Afanasiev-Khodikin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail D. Panteleev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svyatoslav D. Zotov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.08.2025.
The article was submitted 03.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 07.08.2025.