

Научная статья

УДК 669.018.28

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛИТЕЙНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.А. Базылева¹, Э.Г. Римша¹, Е.Б. Чабина¹, А.Н. Раевских¹

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

Аннотация. Представлен расчет химического состава интерметаллидной композиции на основе соединения Ni_3Al с использованием формулы баланса легирования. При этом средняя электронная концентрация представляет собой количество валентных электронов на единицу атомной массы композиции. Исследованы структурные и фазовые превращения в интерметаллидном сплаве на основе соединения Ni_3Al в зависимости от высокотемпературной обработки и в процессе длительных испытаний при температурах 1150, 1200 и 1250 °С. Экспериментально установлена технологичность конструкционного сплава при опробовании отливки заготовок сопловых лопаток турбины компрессора перспективного вертолетного двигателя.

Ключевые слова: интерметаллид, структура, фазовый состав, высокотемпературная обработка, длительная прочность, сопловые лопатки

Для цитирования: Базылева О.А., Римша Э.Г., Чабина Е.Б., Раевских А.Н. Некоторые аспекты создания и исследования конструкционных литейных интерметаллидных сплавов для перспективных вертолетных двигателей // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.

Scientific article

SOME ASPECTS OF CREATION AND RESEARCH OF STRUCTURAL CASTING INTERMETALLIDE ALLOYS FOR PROMISING HELICOPTER ENGINES

O.A. Bazyleva¹, E.G. Rimsha¹, E.B. Chabina¹, A.N. Raevskikh¹

Abstract. The article presents the calculation of the chemical composition of the intermetallic composition based on the Ni_3Al compound using the doping balance formula, while the average electron concentration is the number of valence electrons per unit atomic mass of the composition; studies of structural and phase transformations in an intermetallic alloy based on Ni_3Al depending on high-temperature treatment and during long-term tests at temperatures of 1150, 1200 and 1250 °C. The constructability of the structural alloy was experimentally established when testing the casting of blanks of the nozzle blades of the compressor turbine of a promising helicopter engine.

Keywords: intermetallide, structure, phase composition, high-temperature treatment, long-term strength, nozzle blades

For citation: Bazyleva O.A., Rimsha E.G., Chabina E.B., Raevskikh A.N. Some aspects of creation and research of structural casting intermetallide alloys for promising helicopter engines. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.

Введение

В предисловии к русскому изданию книги «Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок» академик Р.Е. Шалин обращает внимание специалистов на то, что «разработка жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов TiAl, Ti₃Al и NiAl, Ni₃Al остается одним из перспективных направлений, не реализованным в полной мере» [1]. К настоящему времени в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия высокотемпературных конструкционных литейных сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al марок ВКНА и ВИН. Основанием для создания данных сплавов послужили уникальные свойства соединения Ni₃Al: упорядоченная структура L1₂, сохраняющая степень дальнего порядка вплоть до температуры плавления 1390 °С; высокий модуль упругости (173 ГПа); высокое сопротивление окислению благодаря защитному действию пленки Al₂O₃; относительно низкая плотность (7,50 г/см³) [2]. Перечисленные характеристики интерметаллида явились предпосылками для разработки высокотемпературных жаропрочных сплавов, необходимых для повышения мощности модернизируемых и перспективных авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок [3–8].

Выбор интерметаллидного сплава для авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных установок обусловлен их конструктивными особенностями и прогнозируемым ресурсом работы. Для повышения мощности перспективных авиационных двигателей необходимы высокотемпературные жаропрочные сплавы, сохраняющие высокую усталостную долговечность во всем диапазоне рабочих температур. Как правило, это интерметаллидные сплавы с монокристаллической структурой с кристаллографической ориентацией (КГО) [001] и [111] для охлаждаемых и неохлаждаемых турбинных лопаток соответственно. Для наземных газотурбинных установок, когда турбинные лопатки испытывают только статические нагрузки, целесообразно использовать экономнолегированные интерметаллидные сплавы с поликристаллической структурой. Технологический процесс равноосного литья по выплавляемым моделям заготовок деталей турбинных двигателей отработан на предприятиях отрасли с высоким выходом годного [9–21].

С целью повышения эксплуатационного ресурса сопловых лопаток турбины компрессора перспективного вертолетного двигателя исследованы интерметаллидный сплав ВИН4М, изготовленный по ресурсосберегающей технологии, и влияние многослойного теплозащитного покрытия на микроструктурный, фазовый состав и длительную прочность сплава.

Материалы и методы

Исследован литейный интерметаллидный сплав ВИН4М системы Ni₃Al–Cr–Mo–W–Ti–Ta–Re–Co–C–La–Hf–Zr–Y–(Nd+Pr+Er) [22]. Выплавку прутковой (шихтовой) заготовки проводили вакуумным индукционным методом с использованием 50 % отходов [23]. При расчете химического состава интерметаллидной композиции данной системы использовали формулу баланса легирования, учитывая, что применяли кондиционные отходы этого же сплава. Средняя электронная концентрация (E_{cp}) учитывает количество валентных электронов на единицу атомной массы композиции:

$$E_{cp} = \sum_{i=1}^n e_i a_i,$$

где E_{cp} – средняя электронная концентрация, эл/ат.; e_i – концентрация валентных электронов элемента; a_i – атомное процентное содержание элемента.

Стабильное существование γ' -фазы гарантировано при предельном насыщении легирующими элементами и содержании алюминия 8,0–9,0 % (по массе). Высокий уровень длительной прочности интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni_3Al в диапазоне температур 1000–1200 °С обеспечивается при $E_{\text{ср}} = 8,37\text{--}8,40$ эл/ат. [24]. Термостабильность микроструктуры и фазового состава определяется балансом легирования:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \sum E_i C_i - (0,036 \sum A_i C_i + 6,28); \\ -0,02 &< \Delta E \leq 0,02; \\ 8,25 &< \bar{E} \leq 8,37,\end{aligned}$$

где C_i – концентрация i -го химического элемента в составе композиции сплава; A_i – атомная масса i -го элемента; E_i – количество валентных электронов i -го химического элемента; \bar{E} – среднее значение электронной концентрации композиции сплава; ΔE – величина, определяющая дисбаланс легирования.

Диапазон отклонений ΔE учитывает погрешность химического анализа сплавов. При этом несоблюдение указанных условий может стать причиной фазовой нестабильности сплава:

– при $\Delta E < -0,02$ повышается вероятность выделения топологически плотноупакованных фаз, что приводит к обеднению γ'/γ -фаз тугоплавкими легирующими элементами в процессе воздействия термических и/или циклических температурно-силовых нагрузок;

– при $\Delta E > +0,02$ происходят недостаточное упрочнение твердого раствора и возможное образование соединений на основе Ni_3Ti , Ni_3Nb и карбидов [25].

Отливку заготовок под образцы проводили методом направленной кристаллизации на промышленной установке типа УВНК-9А, для создания в заготовках монокристаллической структуры [001] применяли затравки из сплава системы Ni–W с КГО [001] [26–29].

Высокотемпературную газостатическую обработку проводили в газостате «Квинтус-16», имеющем молибденовый двухзонный нагреватель с горячей зоной размером $\varnothing 200 \times 600$ мм. Термическую обработку осуществляли в камерных электропечах сопротивления типа СЭВ-5.5 и СГВ 2.4.2/15И2, предназначенных для заготовок и изделий из жаропрочных сплавов на никелевой и интерметаллидной основах при температуре до 1250 °С в среде азота или аргона с возможностью термообработки в воздушной среде при температуре до 1300 °С; отклонение от заданной температуры в рабочем пространстве печи не должно превышать ± 5 °С. Вакуумную термическую обработку проводили в камерной вакуумной электропечи сопротивления типа ЭСКВЭ-2.4.2/16М7, обеспечивающей давление $\leq 0,04$ Па ($3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.); неравномерность распределения температурного поля рабочего пространства печи не должна превышать ± 5 °С [30–32].

Жаростойкое двухслойное покрытие на основе никелевого (СДП-42) и алюминиевого (ВСДП-16) сплавов наносили на сплав ВИН4М ионно-плазменным методом на установке плазменного газотермического напыления типа АМТ МР200, термобарьерный керамический слой многослойного теплозащитного покрытия – методом атмосферного плазменного напыления на установке МАП-2 [33–35].

Микроструктуру заготовок под образцы исследовали в литом состоянии, после термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ПТО), и после длительных высокотемпературных испытаний с помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром [36]. Определены морфология γ' -фазы, состояние эвтектических фаз и наличие неметаллических включений на основе редкоземельных металлов.

Качественный и количественный микрорентгеноспектральный анализ проведен на установке «Суперпроб-733» с использованием энергодисперсионного микроанализатора. Качественный анализ регистрируемых микроанализатором элементов проводят в диапазоне от В (атомный номер $Z = 5$) до U ($Z = 92$), количественный анализ – от Na ($Z = 11$) до U ($Z = 92$). Локальность анализа составляет 1 мкм^2 , глубина 1 мкм . При расчете состава фаз определяли среднее значение 10–15 измерений различных частиц исследуемой фазы [25]. Коэффициенты ликвации легирующих элементов рассчитывали по формуле

$$K_{\text{л}} = C_{\text{о.д}}/C_{\text{м.д}},$$

где $K_{\text{л}}$ – коэффициент ликвации легирующего элемента; $C_{\text{о.д}}$ и $C_{\text{м.д}}$ – концентрации легирующего элемента в осях дендритов и междендритных пространствах соответственно (ММ 1.595-17-155–2002).

Испытания на длительную прочность проводили по стандартной методике согласно ГОСТ 10145–81.

Количественный металлографический анализ пор на поверхности шлифов проводили в соответствии с ММ 1.595.17-321–2007. Съемку изображений вели с помощью цифровой камеры (3 мегапикселя). Анализовали 25 наихудших полей зрения при увеличении $\times 200$. Площадь кадра составила $558,9 \text{ мкм} \times 558,9 \text{ мкм} = 312369,21 \text{ мкм}^2 = 0,3 \text{ мм}^2$, площадь анализа $0,3 \text{ мм}^2 \times 25 = 7,5 \text{ мм}^2$.

Результаты и обсуждение

Микроструктура интерметаллидного монокристаллического сплава ВИН4М с КГО [001] в литом состоянии и после ПТО имеет дендритно-ячеистое строение (рис. 1, а, з). Оси дендритов и междендритные участки состоят из частиц γ' -фазы, разделенной тонкими прослойками γ -твердого раствора. В осях дендритов частицы γ' -фазы меньше, чем в междендритных участках, и имеют огранку, близкую к кубоидной (рис. 1, в, е), что характерно для КГО [001]. В междендритных участках наряду с частицами γ' -фазы неправильной формы и разного размера расположены глобулы эвтектической γ' -фазы, между которыми наблюдаются выделения неравновесной эвтектики ($\gamma' + \beta$) (рис. 1, б). В результате ПТО в междендритных участках β -фаза полностью растворяется (рис. 1, д), кубоидные частицы γ' -фазы заметно укрупняются (рис. 1, е).

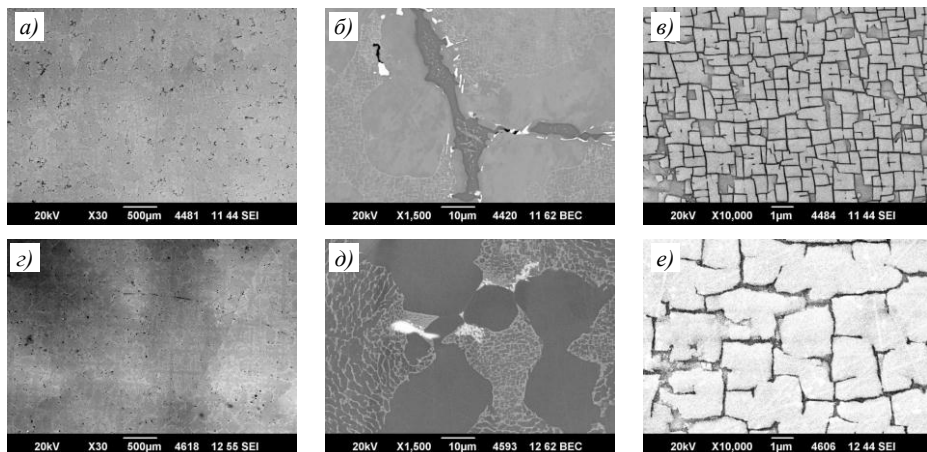


Рис. 1. Микроструктура интерметаллидного сплава ВИН4М в литом состоянии (а–в) и после термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (з–е): дендритно-ячеистое строение (а, з), выделения неравновесной эвтектики ($\gamma' + \beta$) (б, д) и оси I порядка (в, е)

Микрорентгеноспектральный анализ образцов интерметаллидного монокристаллического сплава ВИН4М с КГО [001] в литом состоянии и после ПТО подтвердил дендритное строение материала с наблюдающейся ликвацией легирующих элементов: оси дендритов обогащены вольфрамом, рением и кобальтом, междендритные области – алюминием, титаном, танталом, хромом и молибденом. Наиболее сильно ликвируют вольфрам ($K_L = 1,7$) и титан ($K_L = 0,6$). Определен локальный состав материала образцов из сплава ВИН4М в литом состоянии и после ПТО (табл. 1).

Таблица 1

Локальный состав материала образцов из сплава ВИН4М в литом состоянии и после термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ПТО), и коэффициент ликвации легирующих элементов (K_L)

Условный номер точки анализа	Участок анализа	Содержание элементов, % (по массе), и величина K_L соответствующего элемента									
		Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Ta	W	Re	Всего
<i>Образец 1 литой</i>											
–	Средний состав	8,5	1,0	3,5	5,5	70,2	3,5	3,3	3,3	1,3	100,1
1	Центр оси дендрита	7,3	0,7	3,4	5,9	69,7	3,3	2,7	4,7	2,0	99,8
2	Междендритное пространство	8,3	1,2	4,6	5,4	68,2	4,7	3,4	2,8	1,3	99,9
	$K_L = C_{o,d}/C_{m,d}$	0,9	0,6	0,7	1,1	–	0,7	0,8	1,7	1,5	–
3	Эвтектическая γ' -фаза	10,3	1,8	2,2	4,3	71,7	1,9	4,9	2,4	0,7	100,2
4	Эвтектическая γ -фаза	6,5	1,1	8,5	6,6	60,4	9,3	2,0	3,1	2,2	99,7
5	β -фаза	20,7	0,5	4,8	4,5	68,2	0,7	0,6	Н/о	Н/о	100,0
6	«Белая» фаза (α -(Mo, W, Re))	0,3	0,1	6,3	0,8	5,9	54,2	0,5	16,1	16,3	100,5
<i>Образец 1 после ПТО</i>											
–	Средний состав	8,3	1,1	3,6	5,4	70,2	3,6	3,2	3,3	1,2	99,9
1	Центр оси дендрита	7,9	0,9	4,0	5,7	68,6	3,5	3,0	4,1	2,1	99,8
2	Междендритное пространство	8,0	1,0	4,2	5,5	69,4	4,0	3,1	3,3	1,5	100,0
	$K_L = C_{o,d}/C_{m,d}$	1,0	0,9	1,0	1,0	–	0,9	1,0	1,2	1,4	–
3	Эвтектическая γ' -фаза	9,8	1,7	2,1	4,6	72,5	2,2	4,7	2,1	0,4	100,1
4	Эвтектическая γ -фаза	6,0	1,0	9,6	7,0	56,7	11,2	1,9	3,3	3,1	99,8
<i>Образец 2 литой</i>											
–	Средний состав	8,2	1,1	3,5	5,2	70,6	3,7	3,3	3,1	1,2	99,9
1	Центр оси дендрита	7,6	0,7	3,2	5,8	70,4	3,1	2,6	4,5	1,9	99,8
2	Междендритное пространство	8,7	1,2	4,7	5,2	66,9	5,6	3,7	2,7	1,3	100,0
	$K_L = C_{o,d}/C_{m,d}$	0,9	0,6	0,7	1,1	–	0,6	0,7	1,7	1,5	–
3	Эвтектическая γ' -фаза	10,2	1,8	2,1	4,2	72,4	1,8	5,1	1,9	0,4	99,9
4	Эвтектическая γ -фаза	6,7	1,0	8,8	6,5	59,4	9,5	2,2	3,4	2,3	99,8
5	β -фаза	20,1	0,6	4,7	4,7	68,7	0,7	0,4	Н/о	Н/о	99,9
6	«Белая» фаза (α -(Mo, W, Re))	0,2	0,1	6,2	0,7	6,2	55,8	0,5	14,9	15,8	100,4
<i>Образец 2 после ПТО</i>											
–	Средний состав	8,2	1,1	3,5	5,3	70,4	3,6	3,4	3,3	1,2	100,0
1	Центр оси дендрита	7,8	1,0	4,1	5,7	68,7	3,8	2,8	4,1	1,9	99,9
2	Междендритное пространство	8,1	1,0	4,3	5,6	68,9	4,2	3,0	3,2	1,5	99,8
	$K_L = C_{o,d}/C_{m,d}$	1,0	1,0	1,0	1,0	–	0,9	0,9	1,3	1,3	–
3	Эвтектическая γ' -фаза	9,6	1,7	2,2	4,4	71,4	2,2	4,9	2,4	0,4	99,7
4	Эвтектическая γ -фаза	5,9	0,7	9,5	7,2	58,9	10,4	1,5	2,9	2,8	99,8
6	«Белая» фаза (α -(Mo, W, Re))	0,3	0,2	6,1	0,7	4,1	57,0	0,6	15,2	16,1	100,3

Примечание. Н/о – не обнаружено.

После ПТО химический состав сплава выравнивается, склонность к ликвации снижается. Коэффициенты ликвации легирующих элементов стремятся к 1: для вольфрама изменяются от 1,7 до 1,2–1,3, титана – от 0,6 до 0,9–1,0, тантала – от 0,7–0,8 до 0,9–1,0, рения – от 1,5 до 1,3–1,4, молибдена – от 0,6–0,7 до 0,9.

Микроструктурный анализ показал, что состав монокристаллического сплава ВИН4М с КГО [001] становится более однородным. Фаза на основе Mo, W и Re сохраняется, но ее количество заметно снижается (рис. 2, б, д). Количество β -фазы заметно уменьшается (рис. 2, в, е). Состав эвтектических γ - и γ' -фаз практически не изменяется. Во всех образцах наблюдаются неметаллические включения на основе редкоземельных металлов (лантан, неодим, иттрий, эрбий), содержащие элементы сплава (никель, кобальт, хром). В ходе ПТО неметаллические включения сохраняются в материале и не претерпевают изменений формы (рис. 2, б, д).

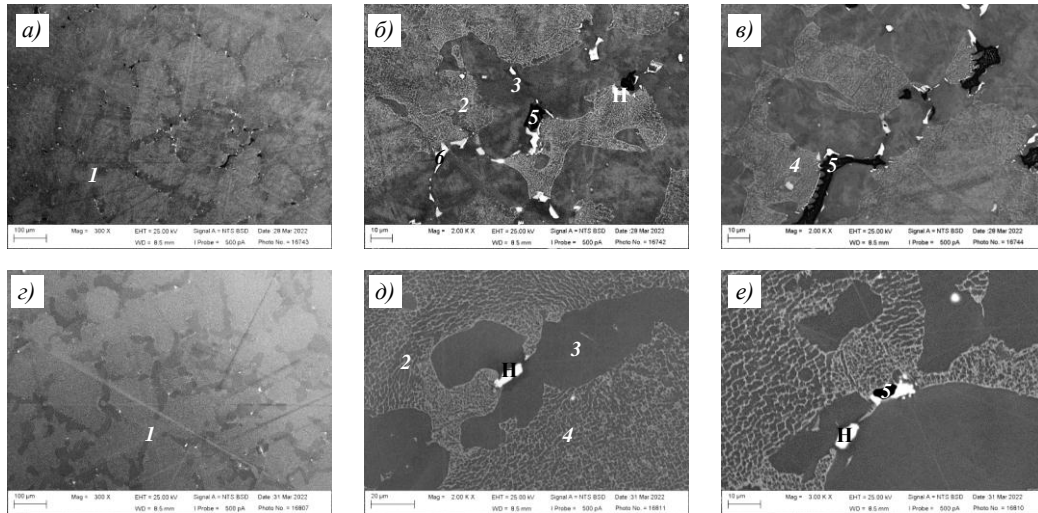


Рис. 2. Микроструктура и участки электронно-зондового микроанализа интерметаллидного сплава ВИН4М в литом состоянии (а–в) и после термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (з–е): 1 – центр оси дендрита (а, з); 2 – междендритное пространство (б, д); 3 – эвтектическая γ' -фаза (б, д); 4 – эвтектическая γ -фаза (в, д); 5 – β -фаза (б, в, е); б – α -(Mo, W, Re)-фаза (б); Н – неметаллические включения (б, д, е)

Для снижения количества неметаллических включений опробована выплавка интерметаллидного конструкционного сплава ВИН4М с использованием 50 % кондиционных отходов этого же сплава. Заготовки под образцы, отлитые методом направленной кристаллизации с использованием затравок из сплава системы Ni–W с КГО [001], и после ПТО исследованы методом электронно-зондового микроанализа. Анализ четырех образцов показал отсутствие неметаллических включений (рис. 3).

Для повышения рабочих характеристик деталей газотурбинных двигателей, эксплуатируемых при высоких температурах, используют жаростойкие и теплозащитные покрытия (ТЗП). Применение в конструкции покрытия термобарьерного керамического слоя является наиболее распространенным способом увеличения ресурса деталей горячей части современных газотурбинных двигателей. Защитный эффект таких покрытий обеспечивается благодаря керамическому слою ТЗП, который при рабочих температурах имеет теплопроводность 2–4 Вт/(м·К), что существенно ниже теплопроводности материала, на который нанесено покрытие ($\geq(18–20)$ Вт/(м·К)). На практике при наличии интенсивного теплоотвода от основного материала по керамическому слою ТЗП толщиной 70–200 мкм происходит перепад температур до 50–150 °С в зависимости от коэффициента теплопроводности керамического слоя, что приводит к снижению температуры на поверхности жаростойкого слоя и продлевает срок службы ТЗП.

Применение ТЗП на сопловых лопатках турбины компрессора вертолетного двигателя ВК-650В из сплава ВИН4М обеспечит рабочую температуру 1150 °С (длительно) с забросами до 1200 °С (кратковременно) за счет термобарьерного эффекта керамического слоя. Таким образом, целесообразно проведение сравнительных испытаний на

длительную прочность при требуемых рабочих температурах для оценки жаропрочности интерметаллидного конструкционного сплава без покрытия и с многослойным теплозащитным покрытием СДП-42 + ВСДП-16 + керамический слой ТЗП $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ (табл. 2).

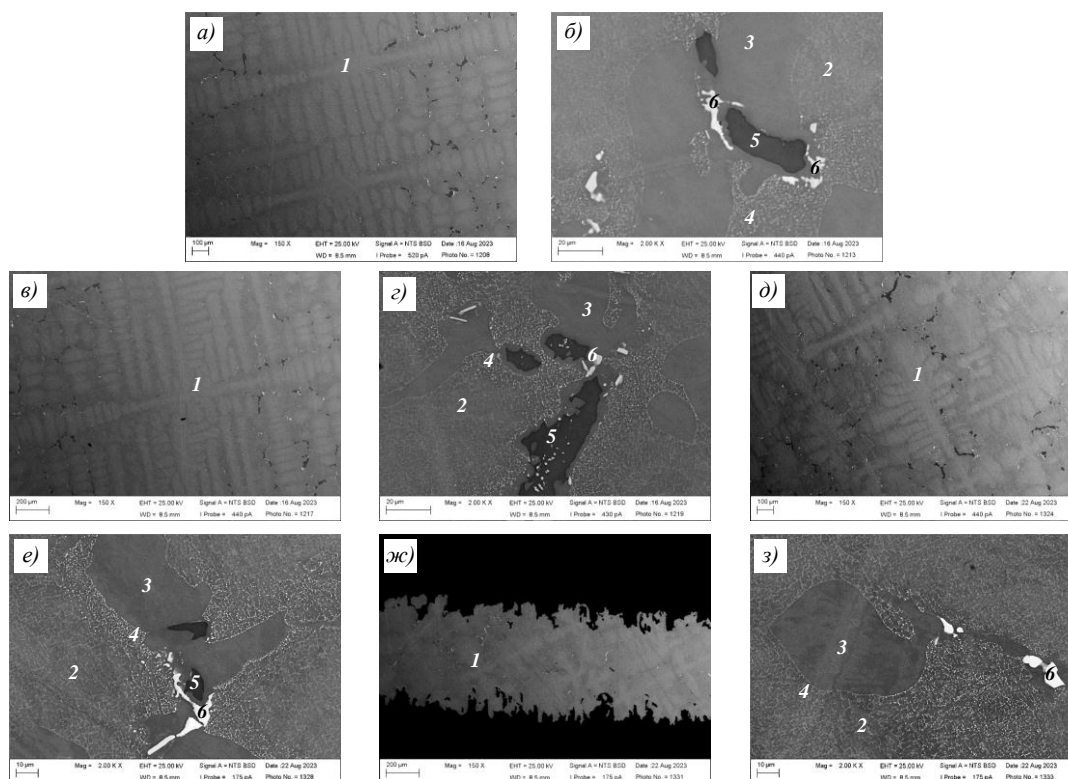


Рис. 3. Микроструктура и участки электронно-зондового микроанализа интерметаллидного сплава ВИН4М с использованием 50 % кондиционных отходов после термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием: 1 – центр оси дендрита (а, в, д, ж); 2 – междендритное пространство (б, г, е, з); 3 – эвтектическая γ' -фаза (б, г, е, з); 4 – эвтектическая γ -фаза (б, г, е, з); 5 – β -фаза (б, г, е); 6 – α -(Mo, W, Re)-фаза (б, г, е, з)

Таблица 2

Средние значения пределов длительной прочности образцов из сплава ВИН4М

Температура испытания, °С	Наличие покрытия	σ_1	σ_5	σ_{10}	σ_{50}	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}
		МПа						
1150	Без покрытия	–	–	–	–	53	35	28
	С покрытием	–	–	–	–	48	30	23
1200	Без покрытия	–	–	65	47	40	–	–
	С покрытием	–	–	60	43	37	–	–
1250	Без покрытия	63	47	40	–	–	–	–
	С покрытием	63	47	40	–	–	–	–

Установлено, что покрытие незначительно ухудшает показатели длительной прочности образцов из сплава ВИН4М в основном на больших базах испытания, обеспечивая при этом защиту лопаток соплового аппарата и образцов-свидетелей при температуре 1150 °С на базе 500 ч (поверхностная плотность образцов с покрытием после 200 ч изменилась в среднем на 38,0 г/м², без покрытия – на 115,0 г/м²). Покрытие можно наносить на лопатки соплового аппарата двигателя ВК-650В из интерметаллидного сплава ВИН4М.

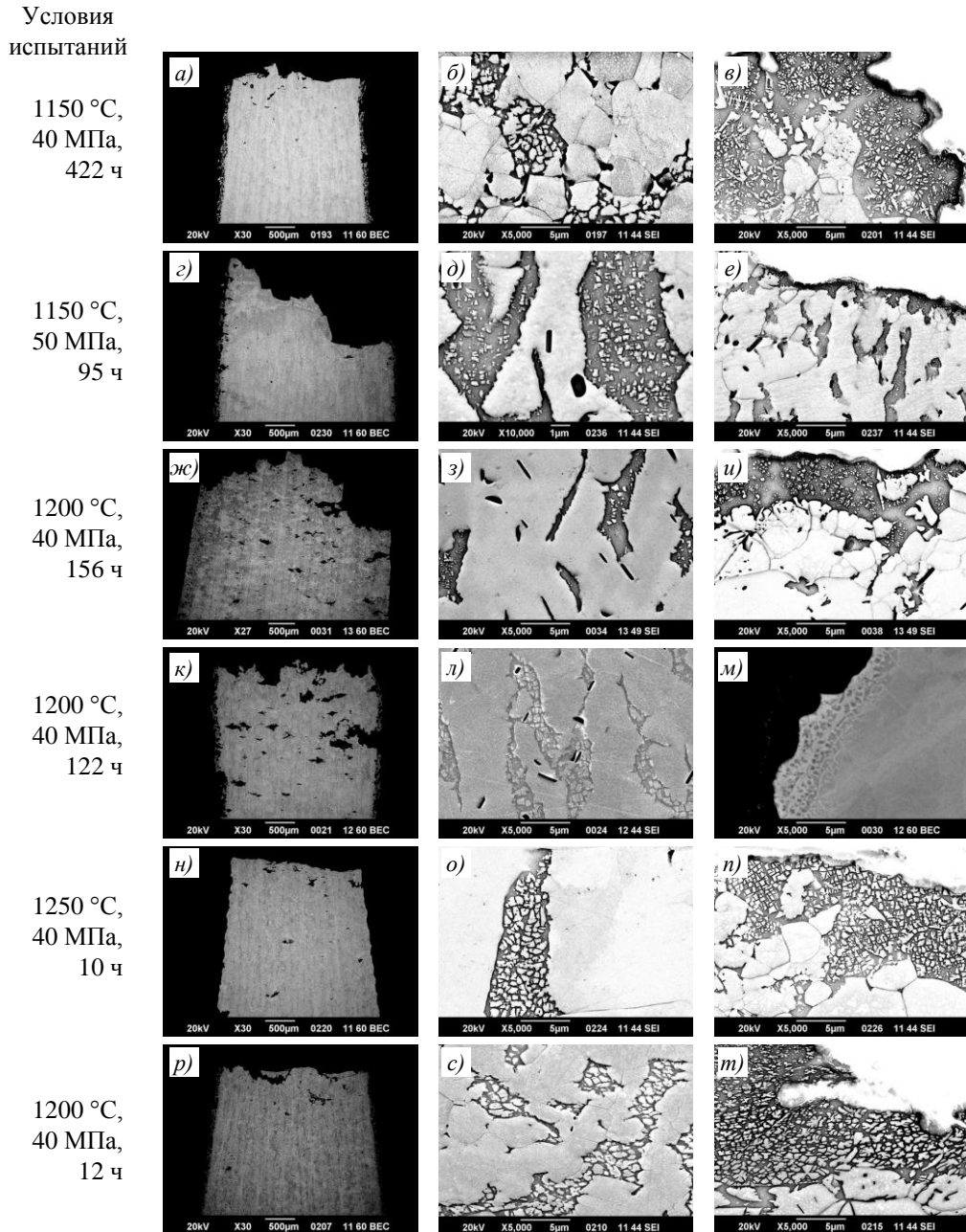


Рис. 4. Микроструктура образцов интерметаллидного сплава ВИН4М без покрытия (а–в, ж–и, н–п) и с покрытием (г–е, к–м, р–т) после испытаний на длительную прочность в различных условиях

Проведен микроструктурный анализ образцов сплава ВИН4М после длительных испытаний при температурах 1150, 1200 и 1250 °С методом растровой электронной микроскопии на шлифах, вырезанных из цилиндрической рабочей части вдоль оси нагружения, вблизи места разрушения. Показано, что все образцы имеют дендритное строение, в междендритных участках присутствуют поры (рис. 4, а, г, ж, к, н, р). В рабочей части исследованных образцов под воздействием температуры и напряжения произошло уширение прослоек γ -твердого раствора. В осях дендритов I порядка толщина прослоек γ -твердого раствора меньше, чем в междендритной области (рис. 4, б, д, з, л, о, с). Во всех образцах присутствуют избыточные фазы различной формы (рис. 4, б, в, д, е, и, л, о, с, т), у излома наблюдается слой, состоящий из вторичных частиц γ' -фазы

(рис. 4, в, е, и, м, n, т). Можно отметить идентичное влияние на микроструктуру образцов с покрытием и без покрытия температуры и напряжения при одинаковой температуре (рис. 4, з, л, о, с). Только различное приложенное напряжение и, соответственно, время до разрушения по-разному влияют на структуру. Так, например, при температуре 1150 °С на образце без покрытия, испытанном при $\sigma = 40$ МПа в течение 422 ч, наблюдается фрагментация первичной γ' -фазы. На образце с покрытием, испытанном при $\sigma = 50$ МПа в течение 95 ч, зафиксировано только уширение прослоек γ' -твердого раствора и выделение вторичной γ' -фазы (рис. 4, б, д). Таким образом, микроструктура образцов сплава ВИН4М с покрытием и без покрытия после длительных испытаний при рабочих температурах 1150 и 1200 °С и при забросе температуры до 1250 °С изменяется аналогично и только толщина жаростойкого слоя несущественно влияет на показатели жаропрочности (табл. 2).

Проведено технологическое опробование интерметаллидного сплава ВИН4М в качестве монокристаллической с КГО [001] конструкции сопловой лопатки турбины компрессора вертолетного двигателя ВК650-В в производственных условиях. Получен положительный результат с выходом годного >75 % требуемой ориентации с отклонением <10 градусов (рис. 5).

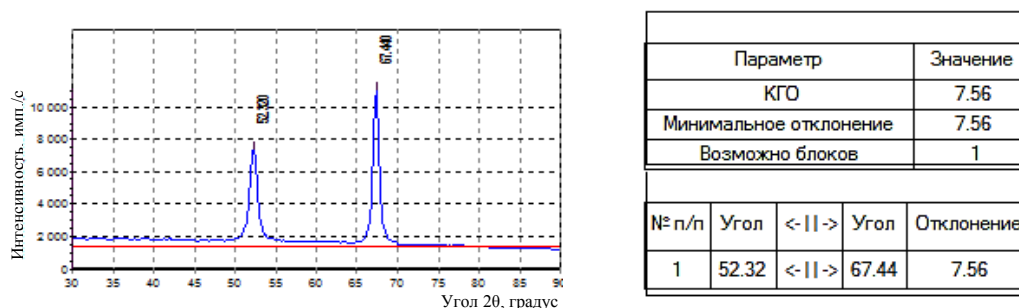


Рис. 5. Рентгенограмма образца стартового конуса отливки сопловой лопатки из сплава ВИН4М, полученная с помощью аппарата ДРОН-4

Оптический количественный анализ образца после ПТО на 25 полях зрения показал, что микропористость по всему сечению отливки сопловой лопатки <0,1 %, что соответствует требованиям к отливкам, получаемым методом направленной кристаллизации (рис. 6, табл. 3).

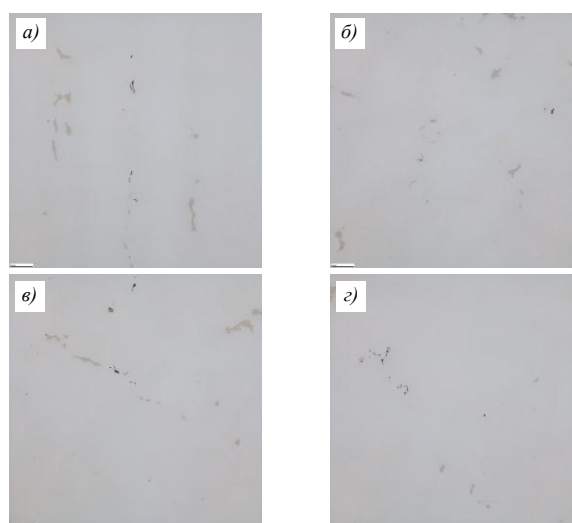


Рис. 6. Поля зрения ($\times 200$) с наибольшим количеством пор на входной (а), выходной (б) кромках, корыте (в) и спинке сопловой лопатки (г)

Результаты количественного анализа пор в отливке сопловой лопатки из сплава ВИН4М

Образец	Средняя доля пор, %	Средний диаметр пор, мкм	Длина пор, мкм	
			средняя	максимальная
Входная кромка	0,03	3,5±0,3	4,6±0,3	50,4
Выходная кромка	0,01	2,6±0,2	3,5±0,3	17,7
Корыто	0,02	3,0±0,1	4,1±0,2	34,9
Спинка	0,03	3,1±0,1	4,2±0,2	41,8

Заключения

При создании интерметаллидного конструкционного сплава системы Ni₃Al–Cr–Mo–W–Ti–Ta–Re–Co–C–La–Hf–Zr–Y–(Nd+Pr+Er) химический состав рассчитан с использованием формулы баланса легирования с целью обеспечения термостабильного структурного и фазового составов.

Установлено, что после ПТО химический состав интерметаллидного конструкционного сплава выравнивается, склонность к ликвации легирующих элементов снижается, сплав приобретает более однородную структуру.

Методом микрорентгеноспектрального анализа в составе конструкционного сплава при выплавке на чистых шихтовых материалах обнаружены неметаллические включения на основе редкоземельных металлов (лантан, неодим, иттрий, эрбий), содержащие никель, кобальт, хром.

При выплавке с использованием 50 % кондиционных отходов монокристаллические образцы сплава с КГО [001], изготовленные методом направленной кристаллизации с использованием затравок из сплава системы Ni–W заданной КГО и прошедшие ПТО, не содержали неметаллические включения, что подтверждено результатами электронно-зондового микроанализа.

Интерметаллидный сплав на основе никеля проявил высокую технологичность при отливке в производственных условиях монокристаллических заготовок сопловых лопаток с КГО [001] вертолетного двигателя ВК650-В с высоким выходом годного (>75 %) требуемой ориентации с отклонением <10 градусов и низкой микропористостью (<0,1 %).

Многослойное теплозащитное покрытие, состоящее из жаростойкого покрытия СДП-42 + ВСДП-16 и керамического слоя, незначительно ухудшает показатели длительной прочности сплава. Однако при наличии покрытия происходит снижение температуры на полотне сопловой лопатки и повышение жаростойкости, что благоприятно отражается на ресурсе работы.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 7.3. «Интерметаллидные никелевые сплавы и композиционные материалы на их основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [37].

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, принявшим участие в проведении исследований. Сплав выплавлен под руководством А.В. Горюнова, монокристаллические отливки получены под руководством к.т.н. Е.М. Висик, жаростойкие и теплозащитные покрытия нанесены на образцы и отливки сопловых лопаток под руководством Н.И. Артеменко, оптический количественный анализ сечения отливки сопловой лопатки проведен Н.А. Лонской.

Список источников

1. Симс Ч., Хагель В. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2 кн. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с.
2. Симс Ч., Хагель В. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2 кн. М.: Металлургия, 1995. Кн. 2. С. 288–298.
3. Зеленков Ю.П., Шмотин Ю.Н., Чупин П.В. Текущее состояние и перспективы суперкомпьютерных вычислений при проектировании газотурбинных двигателей // Вестник Уфимского государственного авиационного университета. 2012. Т. 16. № 3 (48). С. 91–98.
4. Шмотин Ю.Н., Буров М.Н. Повышение надежности и развитие мощностного ряда ГТУ на базе ГТД-110М производства ПАО «НПО «Сатурн» // Газотурбинные технологии. 2017. № 1 (144). С. 2–4.
5. Иноземцев А.А. Двигатель ПД-14 – будущее российского авиапрома // Инновации. 2019. № 12 (182). С. 77–80.
6. Иноземцев А.А. Использование перспективных технологий авиационных газотурбинных двигателей для создания энергетических ГТУ большой мощности // Электрические станции. 2020. № 1 (1062). С. 29–35.
7. Гладкий И.Л., Иноземцев А.А., Морозова М.В. Интеграция двигателя ПД-14 с самолетом МС-21-310 для обеспечения отсутствия опасных последствий при отрыве рабочей лопатки вентилятора // Авиация и космонавтика: Междунар. конф. М.: МАИ (НИУ), 2022. С. 107–108.
8. Иноземцев А.А., Сулимов Д.Д. Опыт и перспектива АО «ОДК-Авиадвигатель» в создании и эксплуатации авиапроизводственных промышленных газотурбинных установок и энергоагрегатов // Газотурбинные технологии. 2022. № 5 (188). С. 2–7.
9. Беликов А.В., Висик Е.М., Герасимов В.В. Модернизация оборудования для направленной кристаллизации монокристаллических отливок // Литейное производство. 2014. № 4. С. 34–36.
10. Висик Е.М., Герасимов В.В., Колядов Е.В., Кузьмина Н.А. Влияние технологических режимов литья на параметры структуры монокристаллов новых жаропрочных сплавов // Металлургия машиностроения. 2016. № 5. С. 27–31.
11. Висик Е.М., Колядов Е.В., Чабина Е.Б., Кузьмина Н.А. Технологические возможности управления структурой отливок из жаропрочных сплавов при направленной кристаллизации // Технология металлов. 2022. № 1. С. 47–56.
12. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Взгляд на историю развития и современные исследования процесса направленной кристаллизации литейных жаропрочных сплавов с управляемым градиентом на фронте роста // Электротехнология. 2018. № 7. С. 33–40.
13. Висик Е.М., Рассохина Л.И., Ечин А.Б., Гамазина М.В. О некоторых аспектах повышения качества литых турбинных лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Вопросы материаловедения. 2021. № 4 (108). С. 89–98.
14. Изотов В.А., Гришихин С.А., Шатульский А.А. Методика расчета коэффициента сопротивлений литниковой системы при изменяющемся напоре // Литейщик России. 2009. № 3. С. 39.
15. Гришихин С.А., Изотов В.А., Шатульский А.А. Расчет коэффициента расхода литниковой системы при различных параметрах металлостатического напора // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2009. № 1 (15). С. 115–119.
16. Рассохина Л.И., Парфенович П.И., Нарский А.Р. Проблемы создания модельных композиций нового поколения на базе отечественных материалов для изготовления лопаток ГТД // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 3 (15). Ст. 07. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 14.12.2023).
17. Яковлев Е.И. Получение отливок из жаропрочных никелевых сплавов с мелкозернистой равноосной структурой и пониженной пористостью // Литейное производство. 2022. № 6. С. 3–6.
18. Li P., Li S.S., Han Y.F. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of Ni₃Al base single crystal superalloy IC6SX // Intermetallics. 2011. Vol. 19. Is. 2. P. 182–186.

19. He X., Zhang J., Peng Y. et al. Microstructure evolution of primary γ' phase in Ni_3Al -base superalloy // *Acta metallurgica sinica*. 2020. Vol. 33. P. 1709–1726.
20. Liwu J., Xuezheng D., Meiling W. Effect of stress on creep behavior of single crystal alloy IC6SX at 980eC // *International Journal of Photoenergy*. 2020. Vol. 3. P. 1–5.
21. Liwu J., Meiling W., Yafang H., Yanna C. Creep behavior and dislocation mechanism of Ni_3Al base single crystal alloy IC6SX at 760eC // *Progress in Natural Science*. 2021. Vol. 9. P. 239.
22. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al и изделие, выполненное из него: пат. 2588949 Рос. Федерация; заявл. 01.04.15; опубл. 10.07.16.
23. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электротехнология*. 2016. № 9. С. 30–41.
24. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Основные принципы легирования интерметаллида Ni_3Al при создании высокотемпературных сплавов // *Материаловедение*. 1998. № 7. С. 13–15.
25. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 12. С. 52–58.
26. Висик Е.М., Герасимов В.В., Колядов Е.В., Филонова Е.В. Особенности монокристаллической структуры турбинных лопаток из безуглеродистых и углеродсодержащих жаропрочных никелевых сплавов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84. № 6. С. 38–43.
27. Висик Е.М., Колядов Е.В., Кузьмина Н.А. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру интерметаллидного никелевого сплава ВИН4М-ВИ при литье монокристаллических заготовок сопловых лопаток // *Труды ВИАМ*. 2023. № 9 (127). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-3-15.
28. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации // *Вопросы материаловедения*. 2021. № 2 (106). С. 55–65.
29. Кузьмина Н.А., Пьянкова Л.А. Контроль кристаллографической ориентации монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов методом рентгеновской дифрактометрии // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
30. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Шестаков А.В., Фесенко Т.В. Структура и свойства интерметаллидного сплава на основе алюминид никеля, микролегированного редкоземельными металлами // *Вопросы материаловедения*. 2018. № 1 (93). С. 35–49.
31. Базылева О.А., Карашаев М.М., Шестаков А.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние температуры отжига на гомогенность интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-3-10.
32. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Чабина Е.Б., Раевских А.Н. Исследование структурно-фазовых превращений в литейном конструкционном сплаве на основе интерметаллида Ni_3Al после высокотемпературных выдержек и в процессе наработки сплава в качестве сопловой лопатки // *Вопросы материаловедения*. 2023. Т. 114. № 2. С. 60–70.
33. Артеменко Н.И. Особенность состояния поверхности газотермических покрытий, полученных методом атмосферного плазменного напыления // *Электротехнология*. 2020. № 2. С. 25–31.
34. Артеменко Н.И., Баринев Д.Я., Аюбян А.Г. Исследование теплофизических свойств керамического материала ZrO_2 –7% Y_2O_3 , полученного различными методами, применяемого для нанесения теплозащитного покрытия // *Электротехнология*. 2022. № 5. С. 24–29.
35. Артеменко Н.И., Татарников С.В., Доронин О.Н. Исследование влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия ZrO_2 –7% Y_2O_3 методом плазменного напыления на производительность технологического процесса // *Труды ВИАМ*. 2023. № 4 (122). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.

36. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. № 5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.11.2023).
37. 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.

References

1. Sims Ch., Hagel V. *Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants*: in 2 books. Moscow: Metallurgiya, 1995, book 1, 384 p.
2. Sims Ch., Hagel V. *Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants*: in 2 books. Moscow: Metallurgiya, 1995, book 2, pp. 288–298.
3. Zelenkov Yu.P., Shmotin Yu.N., Chupin P.V. Current state and prospects of supercomputer computing in the design of gas turbine engines. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo universiteta*, 2012, vol. 16, no. 3 (48), pp. 91–98.
4. Shmotin Yu.N., Burov M.N. Increasing reliability and developing the power range of gas turbine units based on the GTD-110M produced by PJSC NPO Saturn. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2017, no. 1 (144), pp. 2–4.
5. Inozemtsev A.A. The PD-14 engine is the future of the Russian aviation industry. *Innovatsii*, 2019, no. 12 (182), pp. 77–80.
6. Inozemtsev A.A. The use of promising technologies of aviation gas turbine engines for the creation of high-power power gas turbine units. *Elektricheskiye stantsii*, 2020, no. 1 (1062), pp. 29–35.
7. Gladky I.L., Inozemtsev A.A., Morozova M.V. Integration of the PD-14 engine with the MS-21-310 aircraft to ensure the absence of dangerous consequences when the fan blade comes off. *Aviation and Cosmonautics*: abstracts 21st Int. conf. Moscow: MAI (NIU), 2022, pp. 107–108.
8. Inozemtsev A.A., Sulimov D.D. Experience and prospects of JSC «UEC-Aviadvigatel» in the creation and operation of aircraft industrial gas turbine plants and power units. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2022, no. 5 (188), pp. 2–7.
9. Belikov A.V., Visik E.M., Gerasimov V.V. Modernization of equipment for directional crystallization of monocrystalline castings. *Liteynoe proizvodstvo*, 2014, no. 4, pp. 34–36.
10. Visik E.M., Gerasimov V.V., Kolyadov E.V., Kuzmina N.A. Influence of technological casting modes on the structural parameters of single crystals of new heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2016, no. 5, pp. 27–31.
11. Visik E.M., Kolyadov E.V., Chabina E.B., Kuzmina N.A. Technological possibilities for controlling the structure of castings made of heat-resistant alloys during directional crystallization. *Tekhnologiya metallov*, 2022, no. 1, pp. 47–56.
12. Bondarenko Yu.A., Echin A.B. A look at the history of development and modern research into the process of directed crystallization of cast heat-resistant alloys with a controlled gradient at the growth front. *Elektrometallurgiya*, 2018, no. 7, pp. 33–40.
13. Visik E.M., Rassokhina L.I., Echin A.B., Gamazina M.V. On some aspects of improving the quality of cast turbine blades of gas turbine engines made of heat-resistant nickel alloys. *Voprosy materialovedeniya*, 2021, no. 4 (108), pp. 89–98.
14. Izotov V.A., Grishikhin S.A., Shatul'sky A.A. Methodology for calculating the resistance coefficient of a gating system with changing pressure. *Liteyshchik Rossii*, 2009, no. 3, p. 39.
15. Grishikhin S.A., Izotov V.A., Shatul'sky A.A. Calculation of the flow coefficient of the gating system for various parameters of the metallostatic pressure. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2009, no. 1 (15), pp. 115–119.
16. Rassokhina L.I., Parfenovich P.I., Narsky A.R. Problems of creating new generation model compositions based on domestic materials for the manufacture of gas turbine engine blades. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no 3 (15), paper no. 07. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: December 14, 2023).

17. Yakovlev E.I. Production of castings from heat-resistant nickel alloys with a fine-grained equiaxed structure and reduced porosity. *Liteynoe proizvodstvo*, 2022, no. 6, pp. 3–6.
18. Li P., Li S.S., Han Y.F. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of Ni₃Al base single crystal superalloy IC6SX. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, is. 2, pp. 182–186.
19. He X., Zhang J., Peng Y. et al. Microstructure evolution of primary γ' phase in Ni₃Al-base superalloy. *Acta metallurgica sinica*, 2020, vol. 33, pp. 1709–1726.
20. Liwu J., Xuezheng D., Meiling W. Effect of stress on creep behavior of single crystal alloy IC6SX at 980eC. *International Journal of Photoenergy*, 2020, vol. 3, pp. 1–5.
21. Liwu J., Meiling W., Yafang H., Yanna C. Creep behavior and dislocation mechanism of Ni₃Al base single crystal alloy IC6SX at 760eC. *Progress in Natural Science*, 2021, vol. 9, p. 239.
22. *An alloy based on the Ni₃Al intermetallic compound and a product made from it*: pat. 2588949 Rus. Federation; appl. 01.04.15; publ. 10.07.16.
23. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Rigin V.E. Resource-saving technologies for smelting promising cast and wrought super-heat-resistant alloys, taking into account the processing of all types of waste. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 9, pp. 30–41.
24. Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A., Morozova G.I. Basic principles of alloying the Ni₃Al intermetallic compound when creating high-temperature alloys. *Materialovedenie*, 1998, no. 7, pp. 13–15.
25. Morozova G.I. Compensation for the imbalance of alloying of heat-resistant nickel alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 12, pp. 52–58.
26. Visik E.M., Gerasimov V.V., Kolyadov E.V., Filonova E.V. Features of the single-crystal structure of turbine blades made of carbon-free and carbon-containing heat-resistant nickel alloys. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, vol. 84, no. 6, pp. 38–43.
27. Visik E.M., Koljadov E.V., Kuzmina N.A. Influence of directional crystallization parameters on the structure of the intermetallic nickel alloy VIN4M-VI when casting single-crystal blanks of nozzle blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-3-15.
28. Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Preparation of single-crystal [001] seeds from alloys of the Ni–W system by directional crystallization. *Voprosy materialovedeniya*, 2021, no. 2 (106), pp. 55–65.
29. Kuzmina N.A., Pyankova L.A. Control of crystallographic orientation of monocrystalline nickel castings heat-resistant alloys by x-ray diffractometry. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
30. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Shestakov A.V., Fesenko T.V. Structure and properties of an intermetallic alloy based on nickel aluminide microalloyed with rare earth metals. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 1 (93), pp. 35–49.
31. Bazyleva O.A., Karashaev M.M., Shestakov A.V., Arginbaeva E.G. Effect of annealing temperature on the homogeneity of intermetallic alloy based on Ni₃Al compound. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-3-10.
32. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Chabina E.B., Raevskikh A.N. Study of structural-phase transformations in a cast structural alloy based on the Ni₃Al intermetallic compound after high-temperature holding and during the process of operating the alloy as a nozzle blade. *Voprosy materialovedeniya*, 2023, vol. 114, no. 2, pp. 60–70.
33. Artemenko N.I. Features of the surface condition of gas-thermal coatings obtained by atmospheric plasma spraying. *Elektrometallurgiya*, 2020, no. 2, pp. 25–31.
34. Artemenko N.I., Barinov D.Ya., Akopyan A.G. Study of the thermophysical properties of the ceramic material ZrO₂–7% Y₂O₃, obtained by various methods, used for applying a heat-protective coating. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 24–29.

35. Artemenko N.I., Tatarnikov S.V., Doronin O.N. Investigation of the influence of the parameters of applying the ceramic layer of the $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ heat-shielding coating by plasma spraying on the productivity of the technological process. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.
36. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. The use of methods of analytical microscopy and x-ray diffraction analysis for the study of the structural phase state materials. *Trudy VIAM*, 2013, no. 5, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 27, 2023).
37. 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-3.

Информация об авторах

Базылева Ольга Анатольевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Римша Эльвира Гайсаевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чабина Елена Борисовна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Раевских Антон Николаевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga A. Bazyleva, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Elena B. Chabina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton N. Raevskikh, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.02.2024.
The article was submitted 01.02.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.02.2024.