
Научная статья

УДК 669.017.165

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВИН4М ДЛЯ СТАТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.А. Базылева¹, Е.М. Висик¹, Л.В. Морозова¹, Н.А. Лонская¹

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

Аннотация. Представлены микроструктурные исследования монокристаллических образцов с кристаллографической ориентацией [001] из интерметаллидного сплава ВИН4М в литом состоянии и после полной термической обработки, а также образцов, прошедших длительные статические испытания. Проведено фрактографическое исследование образцов после длительных испытаний при различных температурах и напряжениях. Разработана технология отливки заготовок сопловых лопаток и в производственных условиях получена партия монокристаллических отливок сопловых лопаток из интерметаллидного сплава ВИН4М с высоким выходом годного.

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

Для цитирования: Базылева О.А., Висик Е.М., Морозова Л.В., Лонская Н.А. Перспектива применения монокристаллического интерметаллидного сплава ВИН4М для статорных деталей вертолетных двигателей // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17.

Scientific article

THE PROSPECT OF USING THE MONOCRYSTALLINE INTERMETALLIC ALLOY VIN4M FOR STATOR PARTS OF HELICOPTER ENGINES

O.A. Bazyleva¹, E.M. Visik¹, L.V. Morozova¹, N.A. Lonskaya¹

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 microstructural studies of monocrystalline samples of crystallographic orientation [001] of the intermetallic alloy VIN4M in the cast state, after complete heat treatment and samples that have passed long-term static tests. A fractographic study of samples that have undergone long-term tests at various temperatures and stresses is also presented. The technology of casting blanks of nozzle blades has been developed and a batch of monocrystalline nozzle blade castings made of intermetallic alloy VIN4M with high yield has been obtained in production conditions.

Keywords: intermetallic compound, single crystal, structure, phase composition, high temperature treatment, long-term strength, nozzle blades

For citation: Bazyleva O.A., Visik E.M., Morozova L.V., Lonskaya N.A. The prospect of using the monocrystalline intermetallic alloy VIN4M for stator parts of helicopter engines. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17.

Введение

В настоящее время созданы, опробуются и внедряются для изготовления монокристаллических лопаток турбины перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) жаропрочные никелевые сплавы, в то числе содержащие рений и рутений [1–7]. Для снижения массы двигателя и повышения его рабочих температур целесообразно использовать интерметаллидные высокотемпературные материалы с термостабильной структурой [8–16]. С этой целью для получения способом направленного затвердевания в вакуумной плавильно-заливочной установке литых полуфабрикатов из жаропрочного ренийсодержащего сплава ВИН4М (с высокими служебными характеристиками в интервале температур до 1150–1200 °С) необходимо разработать серийную технологию изготовления [17–21] монокристаллических отливок из этого сплава [22] и их термическую обработку [23]. Использование теплозащитных покрытий (ТЗП) для деталей ГТД, а также термобарьерного слоя в схеме построения покрытия служит для увеличения ресурса эксплуатации деталей и узлов современных ГТД. Термобарьерный слой при рабочих температурах имеет теплопроводность в 5–10 раз ниже, чем конструкционный сплав. Опытным путем показано, что при активном теплоотводе при толщине термобарьерного слоя 70–200 мкм температура снижается на 50–150 °С, что обеспечивает увеличение срока эксплуатации комбинированного покрытия [24, 25].

Постановка на перспективный вертолетный двигатель монокристаллических сопловых лопаток из конструкционного жаропрочного никелевого сплава с комбинированным ТЗП обеспечит повышение рабочей температуры деталей до 1150 °С с забросами до 1200 °С.

В данной статье представлены исследования монокристаллических образцов с кристаллографической ориентацией (КГО) [001], прошедших длительные статические испытания, и отливок сопловых лопаток, полученных в опытно-промышленном производстве из конструкционного литейного сплава.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали высокотемпературный сплав системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–Mo–W–PЗМ (редкоземельный металл) [26]. Расчет химического состава исследуемой композиции проводили по формуле, основанной на правилах:

– Юм–Розери – в соответствии с которым кристаллическая структура интерметаллидных композиций характеризуется определенной плотностью валентных электронов (\bar{E});

– компенсационного изоморфизма – согласно которому в композиции Ni₃Al образуется твердый раствор замещения:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n e_i a_i \text{ [эл./ат.]},$$

где \bar{E} – средняя электронная концентрация; e_i – концентрация валентных электронов элемента; a_i – атомный процент элемента.

Согласно гетерофазной теории академика С.Т. Кишкина, высокий уровень жаропрочности интерметаллидных сплавов на основе никеля в интервале температур 1000–1200 °С достигается при плотности валентных электронов $\bar{E} = 8,37–8,40$ эл./ат. [27, 28], а термостабильность поддерживается балансом легирования:

$$\begin{cases} \Delta E = \sum E_i C_i - (0,036 \sum A_i C_i + 6,28) \\ -0,02 < \Delta E \leq 0,02, \end{cases}$$

где C_i – концентрация i -го химического элемента в составе композиции сплава; A_i – атомная масса i -го элемента; E_i – число валентных электронов i -го химического элемента; ΔE – величина, определяющая дисбаланс легирования.

Диапазон отклонений $\Delta E = \pm 0,02$ учитывает погрешность определения химического состава, а превышение этого диапазона влечет за собой фазовую нестабильность сплава [29–31].

Выплавку литой прутковой заготовки осуществляли в вакуумных индукционных печах [32, 33]. Изготовление заготовок образцов и полуфабрикатов сопловых лопаток производили способом направленного затвердевания в вакуумной плавильно-заливочной установке УВНК-9А [17–21]. С целью создания в образцах заданной КГО использовали затравки из композиции, имеющей температуру плавления выше аналогичной температуры основного сплава [22]. Полную термическую обработку проводили следующим образом: две стадии в баротермической установке «Квинтус-16» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, затем высокотемпературный отжиг в открытых камерных печах сопротивления типа СНОЛ, используемых для проведения термической обработки полуфабрикатов из жаропрочных никелевых, кобальтовых и других тугоплавких сплавов при температуре до 1300 °С, с погрешностью по объему печи не более ± 5 °С [23]. Для нанесения двухслойного никель-алюминиевого покрытия использовали ионно-плазменный метод, а для нанесения термобарьерного керамического слоя – метод атмосферного плазменного напыления [24, 25].

Микроструктурный анализ образцов проводили на растровом электронном микроскопе [34–36]. Фрактографический анализ изломов испытанных образцов осуществлен с применением сканирующего электронного микроскопа [37].

Статические испытания на жаропрочность выполняли по стандартной методике согласно ГОСТ 10145–81 [38].

Долю пор определяли методом количественного металлографического анализа при увеличении $\times 200$.

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

Результаты и обсуждение

Сравнительный микроструктурный анализ показал, что сплав имеет дендритно-ячеистое строение (рис. 1, а, з), оси дендритов и междендритные пространства содержат γ' -фазу, разделенную тонкими пластичными выделениями γ -твердого раствора. В осях частицы γ' -фазы мельче, чем в междендритных пространствах, и имеют кубоидную огранку (рис. 1, б, д), что является закономерным для монокристаллической структуры серийных жаропрочных сплавов. В междендритных пространствах наряду с частицами γ' -фазы неправильной формы и разного размера расположены выделения эвтектической γ' -фазы и неравновесной эвтектики $\gamma' + \beta$ (рис. 1, в). В процессе полной термической обработки, включающей газостатирование, в междендритных областях происходит полное растворение β -фазы и кубоидные частицы γ' -фазы заметно укрупняются (рис. 1, е).

С помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром, проведено исследование образцов, прошедших длительные высокотемпературные испытания при 900, 1000 и 1100 °С:

- при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч;
- при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч;

- при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч;
- при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч;
- при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч;
- при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч.

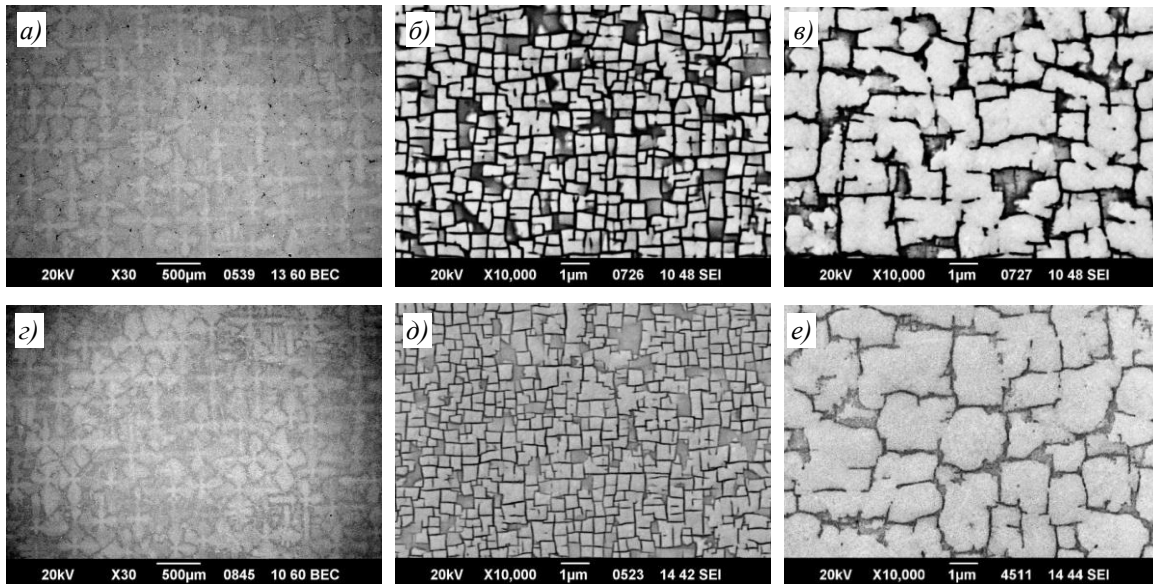


Рис. 1. Микроструктуры заготовок образцов в литом состоянии (а–в) и после полной термической обработки (г–е)

Микроструктурный анализ испытанных образцов показал, что под воздействием высокой температуры, а также напряжения в рабочей части произошла коагуляция – γ' -фаза превратилась в сплошную матричную фазу, а γ -твердый раствор имеет вид включений (рис. 2). В образцах, испытанных при температурах 900 и 1000 °С, в осях дендритов и междендритных участках обнаружено выделение избыточных фаз различной формы (рис. 2, а, б, г, д), а в образцах, испытанных при температуре 1100 °С (рис. 2, в, е), в осях дендритов и междендритных участках прослойки γ -твердого раствора уширяются и в них наблюдается выделение дисперсных вторичных частиц γ' -фазы (в осях дендритов в меньшем количестве).

Фрактографическое исследование структуры показало, что разрушение образцов, испытанных при температуре 900 °С и напряжениях 280 и 155 МПа, развивалось от поверхности, где присутствуют участки с высокотемпературным окислением излома (рис. 3, а, в). На поверхности излома имеются поры со сглаженным рельефом и также следами высокотемпературного окисления (рис. 3, б, в). В участках излома, свободных от пор, разрушение прошло внутризеренно с формированием рельефа, типичного при разрушении жаропрочных никелевых сплавов (рис. 3, г). Анализ изломов образцов после испытаний при температуре 1000 °С и напряжениях 140 и 65 МПа показал аналогичную картину – начало разрушения проходило от микротрещин на поверхности образцов (рис. 3, д), затем внутризеренно на участках, свободных от пор. Следует отметить, что количество пор в образцах, испытанных при температуре 1000 °С, меньше, чем при температуре 900 °С (рис. 3, г). Можно предположить, что из-за меньшего напряжения мелкие поры могут «залечиваться» в процессе испытания. Разрушение при температуре 1100 °С и напряжениях 60 и 35 МПа развивалось от микротрещин на поверхности образца (рис. 3, ж) и внутризеренно (рис. 3, з). Отличительной особенностью таких образцов является большое количество оксидов различных размеров и морфологии (рис. 3, и), что, по-видимому, связано с высокой температурой испытания.

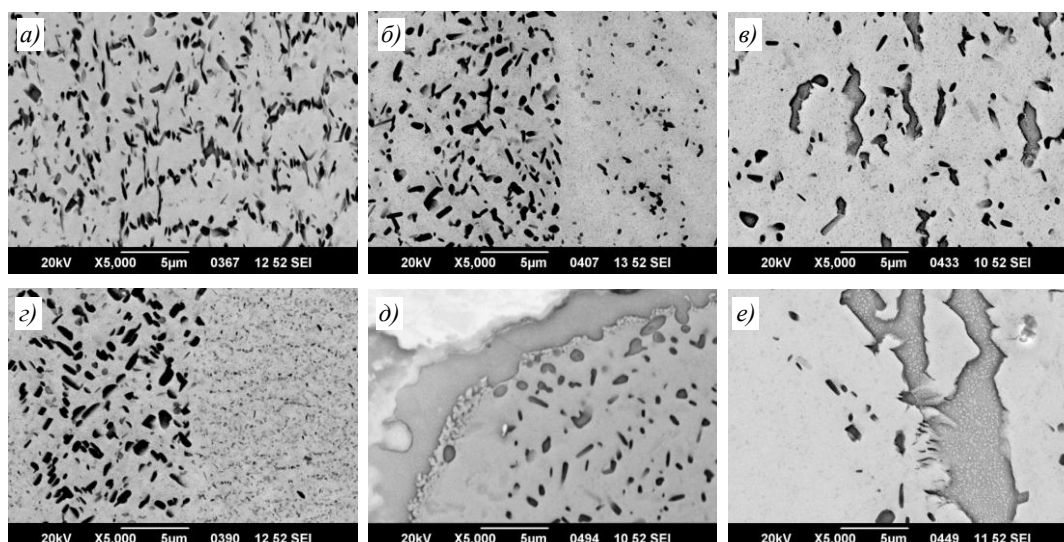


Рис. 2. Микроструктуры разрушенных образцов после длительных высокотемпературных испытаний: *a* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч (ось дендрита первого порядка); *б* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч (в междендритной области); *в* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч (ось дендрита первого порядка); *г* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч (в междендритной области); *д* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч (место разрушения и пора); *е* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч (в междендритной области)

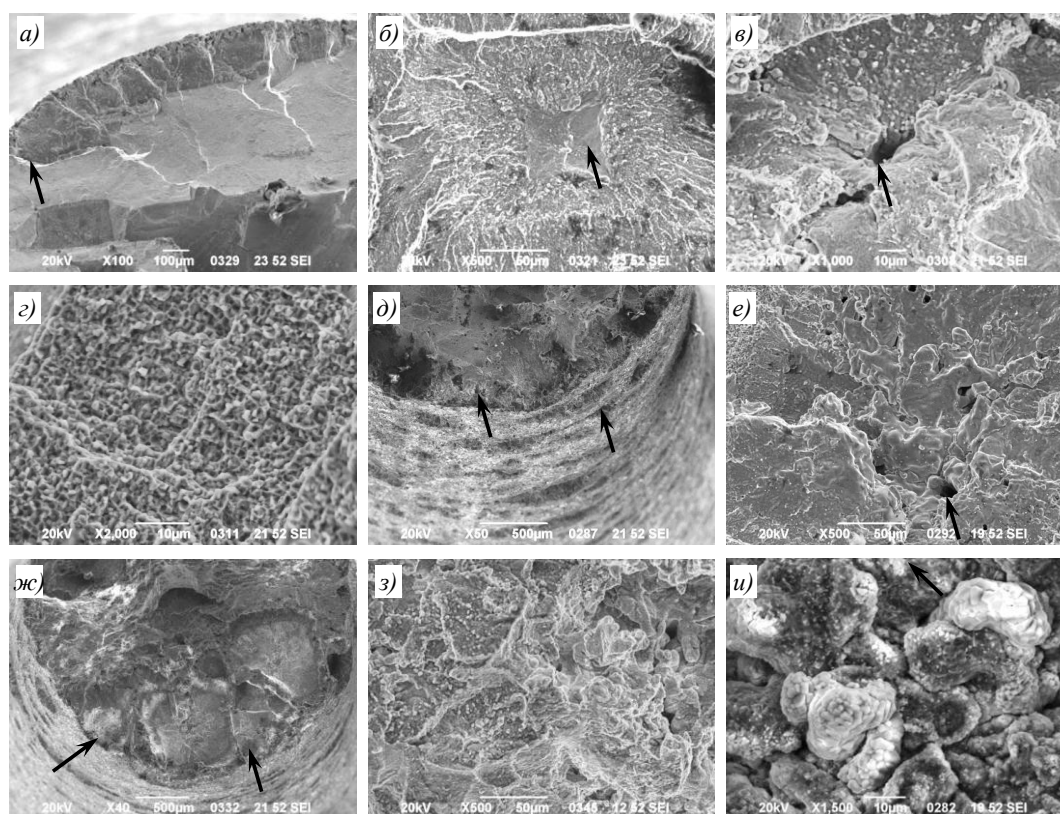


Рис. 3. Фрактографический анализ образцов из интерметаллидного сплава ВИН4М после испытаний на длительную прочность при повышенных температурах: *a, б* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч; *в, г* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч; *д* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч; *е* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч; *ж, з* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч; *и* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч

В производственных условиях ООО «Точка плавления» по рекомендациям специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведена сборка годных восковых моделей сопловых лопаток в модельные блоки – по 4 шт. в блоке [39].

По серийному технологическому процессу проведено изготовление керамических форм, включающее послойное нанесение керамического покрытия на модельные блоки, последующую сушку слоев покрытия, удаление модельной массы и прокатку готовых форм в печи. Для отливки монокристаллических полуфабрикатов сопловых лопаток с регламентированной КГО, проведена установка монокристаллических затравок в затравочные карманы керамических форм и заделка их керамической суспензией.

При технологическом сопровождении специалистов института в промышленных производственных условиях ООО «Точка плавления» на вакуумной плавильно-заливочной установке по режимам, согласно технологической инструкции, проведено опробование разработанной технологии литья монокристаллических полуфабрикатов сопловых лопаток из литейного сплава. По результатам контроля макроструктуры стартовых конусов после заливки пяти плавов по две керамические формы в каждой плавке и контроля их кристаллографической ориентации установлено, что выход годного составляет 76 % по монокристаллической структуре и отклонениям от КГО [001] не более 10 градусов.

По результатам проведенных работ ООО «Точка плавления» выпущен Акт об опробовании.

После проведения термической обработки в соответствии с режимами технологической рекомендации отливки переданы в АО «ОДК-Климов». На полученных отливках сопловых лопаток после проведенной термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием, в АО «ОДК-Климов» осуществлено травление и последующий контроль их макроструктуры, по результатам которого выявлено, что все отливки имеют монокристаллическую макроструктуру и соответствуют техническим требованиям по макроструктуре. Количественный анализ материала отливки сопловой лопатки, прошедшей полную термическую обработку, показал следующие результаты – при допустимой микропористости 0,1 % (по массе) поры составляют сотые доли процента (табл. 1) в четырех сечениях отливки, а именно: во входной (рис. 4, а) и выходной (рис. 4, б) кромках, в корыте (рис. 4, в) и спинке (рис. 4, г).

Таблица 1

Результаты количественного анализа пор в материале образцов из сплава ВИН4М, полученных в производственных условиях

Сечение отливки	Доля пор на 25 полях зрения при $\times 200$, %	Диаметр пор на 25 полях зрения, мкм	Длина пор на 25 полях зрения, мкм	Максимальная длина поры на 25 полях зрения, мкм
	среднее значение			
Входная кромка	0,03	3,5 \pm 0,3	4,6 \pm 0,3	50,4
Выходная кромка	0,01	2,6 \pm 0,2	3,5 \pm 0,3	17,7
Корыто	0,02	3,0 \pm 0,1	4,1 \pm 0,2	34,9
Спинка	0,03	3,1 \pm 0,1	4,2 \pm 0,2	41,8

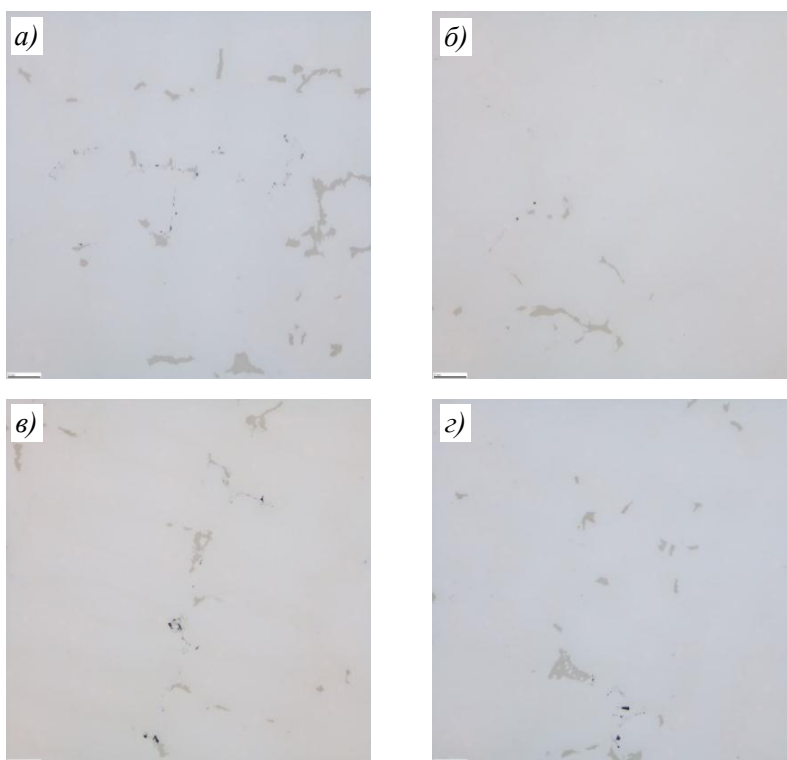


Рис. 4. Поля зрения с наибольшим количеством пор в монокристаллической отливке сопловой лопатки из сплава ВИН4М, прошедшей полную термическую обработку: а, б – входная и выходная кромки; в – корыто; з – спинка

В АО «ОДК-Климов» из литых и термообработанных заготовок сопловых лопаток сплава ВИН4М посредством механической обработки изготовлена партия сопловых лопаток турбины компрессора для нанесения покрытия и выпущен Акт об изготовлении партии. Полученная в результате механической обработки проточной части литых заготовок сопловых лопаток шероховатость поверхностей составила $R_a = 0,46-3,2$ (в среднем – $R_a = 2,5$), что соответствует установленным на предприятии нормам к значениям шероховатости поверхностей проточной части лопаток при их подготовке для нанесения покрытия (рис. 5).



Рис. 5. Сопловые лопатки из сплава ВИН4М-ВИ после механической обработки для нанесения покрытия

При отработке технологических параметров нанесения керамического слоя покрытия на сопловые лопатки (заготовки) из интерметаллидного сплава ВИН4М для обеспечения равномерности толщины и снижения скалывания варьировали ток дуги и дистанцию напыления. Критерием оценки равномерности толщины покрытия является среднеквадратичное отклонение толщины покрытия по выборке из четырех точек – входной и выходной кромкам пера отливки, корыту и спинке. Рассчитанное

по формуле минимальное значение среднеквадратичного отклонения соответствует наибольшей равномерности покрытия. Таким образом, разработана технология и выпущена технологическая инструкция на нанесение многослойного ТЗП на поверхность турбинной лопатки. Нанесено также жаростойкое покрытие на монокристаллические образцы и проведены сравнительные статические испытания с определением времени до разрушения при температурах 1150 и 1200 °С. По результатам испытаний посчитаны средние и минимальные значения жаропрочности сплава ВИН4М на образцах с покрытием и без покрытия (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения пределов длительной прочности образцов из сплава ВИН4М при различной выдержке

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	–	–	–	–

Минимальное снижение жаропрочности образцов из сплава ВИН4М с покрытием по сравнению с образцами без покрытия при температурах 1150, 1200 и 1250 °С на базах испытания: 1, 5 и 10 ч (при 1250 °С); на базах 10, 50 и 100 ч (при 1200 °С); на базах 100, 500 и 1000 ч (при 1150 °С) – можно объяснить сбалансированностью химического состава сплава, которая проявляется и после проведения полной термической обработки, и с диффузионным слоем жаростойкого покрытия (табл. 2).

Изменение структурно-фазового состава в процессе длительных испытаний монокристаллических образцов из сплава ВИН4М с КГО [001] с ТЗП и без покрытия исследовали методом растровой электронной микроскопии (рис. 6).

Исследование микроструктуры испытанных образцов выявило их дендритное строение, причем температурно-напряженное состояние рабочей части приводит к уширению прослоек γ -твердого раствора. В осях дендритов первого порядка толщина прослоек меньше, чем в междендритных участках (рис. 6, б, в, д, е, з, и, л, м, о, п, с, т). Во всех образцах присутствуют избыточные фазы различной формы (рис. 6, а, г, з, и, к, м, н, т). Обращают на себя внимание вторичные частицы γ' -фазы: с повышением температуры испытания с 1150 до 1200 °С они укрупняются, причем на образцах без покрытия в большей степени, чем на образцах с покрытием. В прослойках γ -твердого раствора в осях дендритов первого порядка вторичные частицы γ' -фазы имеют форму, близкую к кубической, а в междендритных участках – они неправильной формы (рис. 6, б, в, д, е, з, и, л, м). Образцы, испытанные при 1250 °С, с покрытием и без покрытия в осях первого порядка и междендритных областях имеют вторичные частицы γ' -фазы неправильной формы и приблизительно одинакового размера (рис. 6, о, п, с, т).

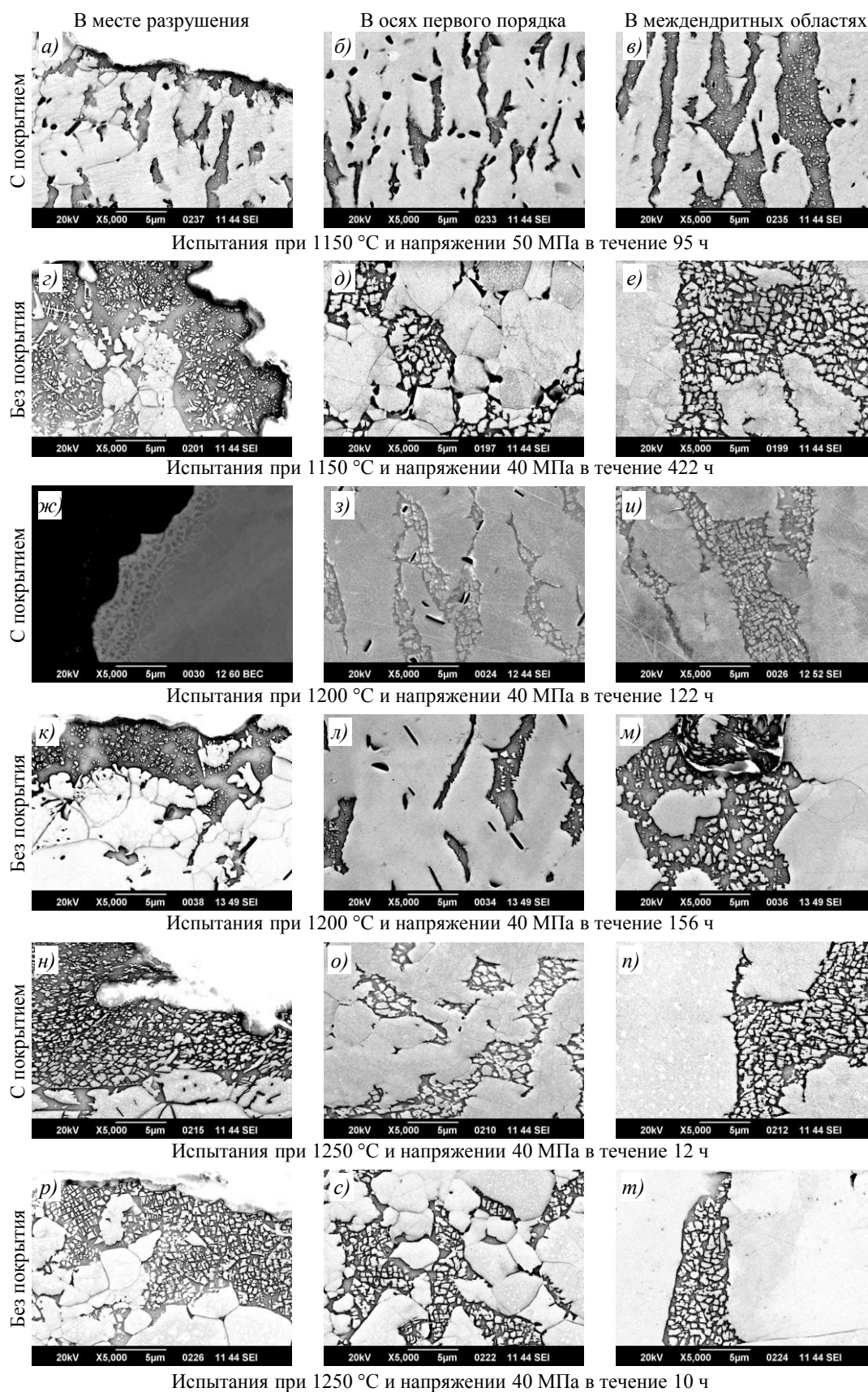


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 5000$) рабочей части образцов из сплава ВИН4М

Заключения

Проведенные микроструктурные исследования монокристаллических образцов из конструкционного сплава ВИН4М в литом состоянии с регламентированной КГО [001] после полной термической обработки, фрактографическое исследование образцов, прошедших длительные статические испытания при различных температурах и напряжениях, а также разработанные и опробованные в промышленных условиях технологии отливки, термической обработки, горячего изостатического прессования, нанесения многослойного ТЗП на поверхность лопатки соплового аппарата из сплава ВИН4М показывают перспективность применения литейного интерметаллидного сплава ВИН4М-ВИ с ТПЗ для сопловых лопаток турбины компрессора вертолетного двигателя с рабочей температурой деталей до 1150 °С, с забросами до 1200 °С [40].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.5. «Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: А.В. Горюнову, под руководством которого выплавлен сплав ВИН4М-ВИ; Н.И. Артеменко, под руководством которого на образцы и отливки сопловых лопаток нанесены жаростойкие и теплозащитные покрытия; А.Н. Раевских, который провел исследования методом растровой электронной микроскопии микроструктуры образцов из сплава ВИН4М-ВИ после испытаний на длительную прочность.

Список источников

1. Зайнуллин Р.И., Ганеев А.А., Шахов Р.В. и др. Микроструктура и механические свойства на сжатие при температурах 1000–1200 °С жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием γ' -образующих элементов // Письма о материалах. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 381–386.
2. Зайцев Н.А., Логунов А.В., Самойленко В.М., Шатульский А.А. Прогнозирование ресурса комплекса «жаропрочный сплав – жаростойкое покрытие» на основе оценки структурной стабильности // Вестник Московского государственного открытого университета. Сер.: Техника и технология. 2012. № 2 (8). С. 5–17.
3. Зайцев Н.А., Логунов А.В., Шатульский А.А., Шмотин Ю.Н. Определение коэффициентов диффузии легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах // Технология металлов. 2011. № 10. С. 38–46.
4. Михайлов А.М., Логунов А.В., Данилов Д.В. Обеспечение повышенного качества жаропрочных никелевых сплавов путем уменьшения допустимого интервала разброса легирующих элементов // Технология металлов. 2024. № 2. С. 30–37.
5. 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). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
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 2 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Чабина Е.Б., Петрушин Н.В., Филонова Е.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н. Эволюция структуры и фазового состава материала рабочей лопатки из сплава ЖС32 в результате воздействия эксплуатационных факторов // Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 85–97.

8. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Бунтушкин В.П. и др. Термостабильность структуры сплава на основе Ni_3Al и его применение в рабочих лопатках малоразмерных ГТД // *Металлы*. 2003. № 3. С. 90–100.
9. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСИС, 2008. 327 с.
10. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
11. Шевцова Л.И. Исследование сплава ВКНА-1В, полученного методом SLS с предварительной механической активацией порошков // *Металлург*. 2023. № 8. С. 63–70.
12. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург, 2002. 359 с.
13. Verhoeven J.D., Lee J.H., Laabs F.C., Jones L.L. The phase equilibria of Ni_3Al evaluated by directional solidification and diffusion couple experiment // *Journal Phase Equilibrium*. 1991. Vol. 12. No. 1. P. 15–23.
14. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni_3Al Based Intermetallic alloys – Current Stage and Potential Perceptivities // *Materials*. 2015. No. 8. P. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
15. Yao Y., Xing C., Peng H. Solidification microstructure and tensile deformation mechanisms of selective electron beam melted Ni_3Al -based alloy at room and elevated temperatures // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 802. P. 16–25. DOI: 10.1016/j.msea.2020/140629.
16. Zhao Y., Chang Y., Li X. et al. P phase precipitation and strengthening behavior of a novel polycrystalline Ni_3Al -based intermetallic alloy at 1100 °C // *Acta Materialia*. 2023. Vol. 12. P. 1–32. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119601.
17. Elliot A.J., Karney G.B., Pollock T.M., Gigliotti M.F.X. Issue in Processing by the Liquid-Sn Assisted Directional Solidification Technique // *Superalloys*. Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 421–445.
18. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Колодяжный М.Ю., Нарский А.Р. Влияние условий направленной кристаллизации и размера лопаток ГТД на особенности дендритной структуры никелевых жаропрочных сплавов // *Электromеталлургия*. 2023. № 4. С. 2–9. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-4-2-9.
19. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Направленная кристаллизация жаропрочного сплава с переменным управляемым градиентом // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 3 (87). С. 50–58.
20. 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 // *Электromеталлургия*. 2018. № 7. С. 33–40. DOI: 10.31044/1684-5781-2018-0-7-33-40.
21. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. и др. Развитие технологии и оборудования для получения лопаток горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией и монокристаллической структурой // *Электromеталлургия*. 2023. № 7. С. 3–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-7-3-11.
22. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации // *Вопросы материаловедения*. 2021. № 2 (196). С. 55–65.
23. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Карачевцев Ф.Н., Назаркин Р.М. Структура и жаропрочность интерметаллидного ренийсодержащего сплава после термической обработки // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Сер.: Машиностроение*. 2019. № 6 (129). С. 17–31.
24. 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: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.

25. Будиновский С.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С. Нанесение защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали на установках типа МАП // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
26. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al и изделие, выполненное из него: пат. 2588949 Рос. Федерация; заявл. 01.04.15; опубл. 10.07.16.
27. 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.
28. Кишкин С.Т., Морозова Г.И. Особенности метода физико-химического фазового анализа современных жаропрочных никелевых сплавов // *Вопросы авиационной науки и техники*. Сер.: Авиационные материалы. М., 1987. С. 86–93.
29. Каблов Е.Н., Кишкин С.Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // *Газотурбинные технологии*. 2002. № 1 (16). С. 34–37.
30. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 12. С. 52–58.
31. 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> (дата обращения: 24.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.
32. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин Д.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: ВИАМ, 2016. 368 с.
33. Петров Д.Н., Гарибов Г.С., Авдюхин С.П. и др. Особенности формирования плотной структуры литой прутковой заготовки // *Технология легких сплавов*. 2006. № 4. С. 57–60.
34. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н., Тренинков И.А. Высокоградиентная направленная кристаллизация интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al системы $Ni-Al-Ta$, упрочненного фазой TaC // *Труды ВИАМ*. 2017. № 3 (51). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1.
35. Раевских А.Н. Применение цифровых технологий для выявления неоднородных концентрационных зон в структуре жаропрочных никелевых сплавов, в том числе полученных селективным лазерным спеканием // *Вопросы материаловедения*. 2020. № 4 (104). С. 32–47.
36. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Чабина Е.Б. и др. 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. № 2. С. 60–70.
37. Морозова Л.В. Фрактографический анализ эксплуатационных разрушений конических зубчатых колес с центрального привода авиационных газотурбинных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 22 с.
38. Нарский А.Р. Из истории отечественного авиационного материаловедения. Отдел испытания авиационных материалов ЦАГИ в архивных документах (1925–1933 гг.) // *История науки и техники*. 2013. № 9. С. 44–52.
39. 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://materialsnews.ru> (дата обращения: 24.05.2024).
40. Логунов А.В. *Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин*. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2017. 852 с.

References

1. Zaynullin R.I., Ganeev A.A., Shakhov R.V. et al. Microstructure and mechanical properties in compression at temperatures of 1000–1200 °C of heat-resistant nickel alloys with a high content of γ' -forming elements. *Pisma o materialakh*, 2020, vol. 10, no. 4 (40), pp. 381–386.

2. Zaitsev N.A., Logunov A.V., Samoylenko V.M., Shatul'sky A.A. Forecasting the resource of the «heat-resistant alloy – heat-resistant coating» complex based on an assessment of structural stability. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 2 (8), pp. 5–17.
3. Zaitsev N.A., Logunov A.V., Shatul'sky A.A., Shmotin Yu.N. Determination of diffusion coefficients of alloying elements in heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya metallov*, 2011, no. 10, pp. 38–46.
4. Mikhailov A.M., Logunov A.V., Danilov D.V. Ensuring improved quality of heat-resistant nickel alloys by reducing the permissible range of dispersion of alloying elements. *Tekhnologiya metallov*, 2024, no. 2, pp. 30–37.
5. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
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 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Chabina E.B., Petrushin N.V., Filonova E.V., Elyutin E.S., Raevskikh A.N. Evolution of the structure and phase composition of the material of the working blade made of ZhS32 alloy as a result of the impact of operational factors. *New materials and technologies for deep processing of raw materials - the basis for innovative development of the Russian economy: Proc. III Int. scientific-technical. conf. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM*, 2022, pp. 85–97.
8. Povarova K.B., Kazanskaya N.K., Buntushkin V.P. et al. Thermal stability of the structure of the alloy based on Ni₃Al and its application in the working blades of small-sized gas turbine engines. *Metally*, 2003, no. 3, pp. 90–100.
9. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et al. *Structure and properties of intermetallic materials with nanophase strengthening*. Moscow: MISIS, 2008, 327 p.
10. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
11. Shevtsova L.I. Study of VKNA-1V alloy obtained by SLS with preliminary mechanical activation of powders. *Metallurg*, 2023, no. 8, pp. 63–70.
12. Grinberg B.A., Ivanov M.A. *Intermetallics Ni₃Al and TiAl: microstructure, deformation behavior*. Ekaterinburg, 2002, 359 p.
13. Verhoeven J.D., Lee J.H., Laabs F.C., Jones L.L. The phase equilibria of Ni₃Al evaluated by directional solidification and diffusion couple experiment. *Journal Phase Equilibrium*, 1991, vol. 12, no. 1, pp. 15–23.
14. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al Based Intermetallic alloys – Current Stage and Potential Perceptivities. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
15. Yao Y., Xing C., Peng H. Solidification microstructure and tensile deformation mechanisms of selective electron beam melted Ni₃Al-based alloy at room and elevated temperatures. *Materials Science & Engineering A*, 2021, vol. 802, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.msea/2020/140629.
16. Zhao Y., Chang Y., Li X. et al. P phase precipitation and strengthening behavior of a novel polycrystalline Ni₃Al-based intermetallic alloy at 1100 °C. *Acta Materialia*, 2023, vol. 12, pp. 1–32. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119601.
17. Elliot A.J., Karney G.B., Pollock T.M., Gigliotti M.F.X. Issue in Processing by the Liquid-Sn Assisted Directional Solidification Technique. *Superalloys. Minerals, Metals & Materials Society*, 2004, pp. 421–445.
18. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Kolodyazhny M.Yu., Narskiy A.R. Effect of directional solidification conditions and GTE blade size on the features of the dendritic structure of nickel-based heat-resistant alloys. *Electrometallurgiya*, 2023, no. 4, pp. 2–9. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-4-2-9.

19. Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Directional solidification of a heat-resistant alloy with a variable controlled gradient. *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, no. 3 (87), pp. 50–58.
20. Bondarenko Yu.A., Echin A.B. A look at the history of development and modern research of the process of directional solidification of cast heat-resistant alloys with a controlled gradient at the growth front. *Elektrometallurgiya*, 2018, no. 7, pp. 33–40. DOI: 10.31044/1684-5781-2018-0-7-33-40.
21. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. et al. Development of technology and equipment for producing hot path blades of gas turbine engines from heat-resistant alloys with directional solidification and single-crystal structure. *Elektrometallurgiya*, 2023, no. 7, pp. 3–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-7-3-11.
22. Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Obtaining single-crystal [001] seeds from Ni–W system alloys by directional crystallization. *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, no. 2 (196), pp. 55–65.
23. Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Karachevtsev F.N., Nazarkin R.M. Structure and heat resistance of intermetallic rhenium-containing alloy after heat treatment. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana, Ser.: Mashinostroyeniye*, 2019, no. 6 (129), pp. 17–31.
24. 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: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.
25. Budinovskiy S.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S. Deposition of protective ion-plasma coatings on largescale parts on MAP type installations. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
26. *Alloy based on the intermetallic compound Ni_3Al and a product made from it*: pat. 2588949 Rus. Federation; appl. 01.04.15; publ. 10.07.16.
27. Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A., Morozova G.I. Basic principles of alloying the intermetallic compound Ni_3Al when creating high-temperature alloys. *Materialovedenie*, 1998, no. 7, pp. 13–15.
28. Kishkin S.T., Morozova G.I. Features of the method of physicochemical phase analysis of modern heat-resistant nickel alloys. *Voprosy aviatsionnoy nauki i tekhniki. Ser.: Aviatsionnye materialy*. Moscow, 1987, pp. 86–93.
29. Kablov E.N., Kishkin S.T. Prospects for the use of cast heat-resistant alloys for the production of turbine blades for gas turbine engines. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2002, no. 1 (16), pp. 34–37.
30. Morozova G.I. Compensation for the imbalance of alloying heat-resistant nickel alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 12, pp. 52–58.
31. 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> (accessed: May 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.
32. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin D.E. *Metallurgy of cast heat-resistant alloys: technology and equipment*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2016, 368 p.
33. Petrov D.N., Garibov G.S., Avdyukhin S.P. et al. Features of the formation of a dense structure of a cast rod blank. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2006, no. 4, pp. 57–60.
34. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Raevskikh A.N., Treninkov I.A. High-gradient directional solidification of intermetallic Ni–Al–Ta alloy based on Ni_3Al , strengthened by TaC-phase. *Trudy VIAM*, 2017, no. 3 (51), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1.
35. Raevskikh A.N. Application of digital technologies for identifying inhomogeneous concentration zones in the structure of heat-resistant nickel alloys, including those obtained by selective laser sintering. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 4 (104), pp. 32–47.

36. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Chabina E.B. et al. Study of structural and phase transformations in a casting structural alloy based on the intermetallic compound Ni₃Al after high-temperature holding and during the production of the alloy as a nozzle blade. *Voprosy materialovedeniya*, 2023, vol. 114, no. 2, pp. 60–70.
37. Morozova L.V. *Fractographic analysis of operational failures of bevel gears from the central drive of aircraft gas turbine engines*: abstract thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 22 p.
38. Narsky A.R. From the history of domestic aviation materials science. Department of testing of aviation materials of TsAGI in archival documents (1925–1933). *Istoriya nauki i tekhniki*, 2013, no. 9, pp. 44–52.
39. Rassokhina L.I., Parfenovich P.I., Narsky A.R. Problems of creating a new generation of model compositions based on domestic materials for the manufacture of gas turbine engine blades. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 3 (15), art. 07. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed: May 24, 2024).
40. Logunov A.V. *Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines*. Rybinsk: Gazoturbinnyye tekhnologii, 2017, 852 p.

Информация об авторах

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

Висик Елена Михайловна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонская Наталья Александровна, ведущий инженер, 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

Elena M. Visik, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 08.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.08.2024.
The article was submitted 08.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.08.2024.