

Научная статья

УДК 669.017.165

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-13-24

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВКНА-1В МОНО ВЗАМЕН СПЛАВА ВКНА-1ВР ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ГТД

Э.Г. Римша¹, О.А. Базылева¹, С.А. Луцкая¹, Ю.В. Артеменко¹

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

Аннотация. Представлены сравнительные исследования структуры, фазового состава, механических свойств и длительной прочности литейных конструкционных сплавов на основе соединения Ni_3Al марок ВКНА-1ВР с поликристаллической структурой и ВКНА-1В Моно в двух кристаллографических ориентациях [111] и [001]. Показано, что рассчитанные с учетом баланса легирования интерметаллидные сплавы прошли технологическое опробование с положительным результатом при изготовлении отливок сопловых лопаток турбины высокого давления. Сопловые лопатки из сплава ВКНА-1ВР также эксплуатировались на перспективном газотурбинном двигателе с положительным эффектом.

Ключевые слова: интерметаллид, соединение Ni_3Al , баланс легирования, состав сплава, фаза, поликристаллическая структура, монокристаллическая структура, механические свойства, длительная прочность

Для цитирования: Римша Э.Г., Базылева О.А., Луцкая С.А., Артеменко Ю.В. Исследование целесообразности применения интерметаллидного сплава ВКНА-1В Моно взамен ВКНА-1ВР для изготовления сопловых лопаток турбины высокого давления перспективного ГТД // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 13–24. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-13-24.

Scientific article

STUDY OF THE FEASIBILITY OF USING INTERMETALLIC ALLOY VKNA-1V MONO INSTEAD OF ALLOY VKNA-1VR FOR THE MANUFACTURE OF NOZZLE BLADES OF A HIGH-PRESSURE TURBINE OF A PROMISING GAS TURBINE ENGINE

E.G. Rimsha¹, O.A. Bazyleva¹, S.A. Lutskaya¹, J.V. Artemenko¹

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 comparative studies of the structure, phase composition, mechanical properties and long-term strength of casting structural alloys based on the Ni_3Al compound VKNA-1VR with a polycrystalline structure and VKNA-1V Mono in two crystallographic orientations [111] and [001]. It is shown that the intermetallic alloys calculated taking into account the balance of alloying have passed technological testing with a positive result in the manufacture of castings of nozzle blades of a high-pressure turbine. VKNA-1VR alloy nozzle blades were also used on a promising gas turbine engine with positive results.

Keywords: intermetallic, compound Ni_3Al , balance of alloying, composition of the alloy, phase, polycrystalline structure, monocrystalline structure, mechanical properties, long-term strength

For citation: Rimsha E.G., Bazyleva O.A., Lutskaya S.A., Artemenko J.V. Study of the feasibility of using intermetallic alloy VKNA-1V Mono instead of VKNA-1VR for the manufacture of nozzle blades of a high-pressure turbine of a promising gas turbine engine. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 13–24. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-13-24.

Введение

Для современных и перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газоперекачивающих агрегатов необходимы экономнолегированные конструкционные материалы с низкой плотностью и относительно невысокой стоимостью. Актуальными задачами также являются увеличение температуры газа перед турбиной, снижение массы двигателя и улучшение характеристик надежности. С этой целью необходима разработка высокотемпературных конструкционных материалов, длительно эксплуатируемых при температурах до 1300 °С, обладающих термически стабильной структурой и сравнительно невысокой массой [1–4].

В настоящее время рабочие и сопловые лопатки современных ГТД изготавливаются из высокожаропрочных сложнолегированных никелевых сплавов с гранцентрированной кубической (ГЦК) неупорядоченной структурой, упрочненных вторичными выделениями γ' (Ni₃Al)-фазы с упорядоченной ГЦК-структурой.

Уровень жаропрочности как зарубежных (TRW-NASA VIA, CMSX-7, CMSX-8, TMS-238), так и отечественных никелевых суперсплавов типа ЖС/ВЖ (ЖС6У, ЖС32, ВЖ47 (ВЖМ1), ВЖМ4, ВЖМ8 и др.) реализуется посредством значительного количества (до 40–60 % (объемн.)) выделений γ' -фазы Ni₃Al, которые выделяются при распаде пересыщенной γ -фазы (твердого раствора на основе никеля), и их высокой дисперсности. Кристаллическая решетка частиц γ' -фазы идентична ГЦК-решетке частиц γ -фазы, только значение параметра решетки γ' -фазы на 0,3–0,5 % меньше параметра решетки γ -фазы [5, 6].

Температурный диапазон применения жаропрочных никелевых сплавов в качестве деталей (1050–1100 °С) определяется тем, что эти материалы при указанных температурах теряют свои прочностные свойства – в первую очередь вследствие повышения растворимости выделений γ' -фазы Ni₃Al в γ -матрице и уменьшения их объемной доли, а также округления частиц γ' -фазы [7, 8].

Для повышения рабочих температур деталей горячего тракта ГТД – в первую очередь статорных деталей, сопловых лопаток, элементов камер сгорания, проставок и др. – наиболее перспективным направлением является разработка литейных высокотемпературных конструкционных сплавов системы Ni–Al и технологий их получения [9–18].

Ранее проведенными исследованиями определено, что оптимальным сочетанием физических, механических свойств и долговечности в интервале температур 900–1250 °С, а также при комнатной температуре, обладают интерметаллидные сплавы на основе соединения Ni₃Al, содержащие в объеме дендритов 5–10 % (по массе) пластичной γ -фазы (твердый раствор на основе никеля), а по границам зерен для их упрочнения – карбидную фазу или пластичные при высоких температурах частицы γ -фазы [19]. При этом уровень жаропрочности литейных конструкционных сплавов при температурах 900–1250 °С изменяется в зависимости от технологии изготовления заготовок и повышается от равноосного к направленному методу, максимальный уровень реализуется в монокристаллических отливках с кристаллографической ориентацией (КГО) [111]. Для конструкционных сплавов на основе интерметаллидного соединения Ni₃Al разработаны технология выплавки в вакуумных индукционных печах, обеспечивающая минимальное содержание примесей и газов, и технология изготовления отливок с поликристаллической, дендритной столбчатой и монокристаллической структурами, что позволило получить комплекс свойств, разработать паспорта и дополнения к паспортам на интерметаллидные сплавы для их технологического и эксплуатационного опробования.

Цель настоящей статьи – представить результаты сравнительных исследований интерметаллидных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В, опробованных в качестве сопловых лопаток турбины и сегментов камеры сгорания перспективных ГТД.

Материалы и методы

Выплавку и отливку заготовок образцов и полуфабрикатов деталей проводили на вакуумных индукционных установках: изготовление отливок из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР с поликристаллической структурой – методом точного литья по выплавляемым моделям, а отливок с дендритной столбчатой (направленной) структурой – методом направленной кристаллизации без затравок и с затравками заданной кристаллографической ориентации для получения монокристаллической структуры [20–29]. При расчете химического состава плавок в пределах паспорта применяли метод, контролирующий концентрацию валентных электронов, участвующих в образовании общего электронного облака при металлической связи, и учитывающий максимальную реализацию межатомных связей в кристаллической решетке для стабильности фазового состава и структуры [30, 31].

Химический состав сплавов по основным легирующим элементам (хром, вольфрам, молибден, титан, гафний, цирконий, алюминий) проверяли атомно-эмиссионным методом на оптико-эмиссионном спектрометре, содержание кислорода и азота – методом плавления в потоке инертного газа, серы и углерода – на контрольно-измерительных приборах методом инфракрасной абсорбции, содержание примесей – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [32, 33]. Испытания на растяжение для определения механических свойств, в частности длительной прочности и показателей кратковременной прочности (пределы прочности и текучести, относительное удлинение и сужение), проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 10145–81 «Металлы. Испытания на длительную прочность» и ГОСТ 1497–2023 «Металлы. Метод испытания на растяжение» [34]. Микроструктуру заготовок образцов и образцов после опробования интерметаллидных сплавов системы «никель–алюминий» (Ni_3Al) исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждения

Химический состав исследуемых образцов конструкционных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав конструкционных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)									
	Ni	Al	Cr	Mo	W	Ti	Hf	Zr	C	La
ВКНА-1ВР*	Основа	8,68	5,60	3,71	3,60	1,48	0,40	–	0,14	–
ВКНА-1В**	Основа	8,80	5,65	4,05	3,52	1,50	–	0,08	–	0,05

* Состав защищен патентом РФ № 2304179.
** Состав защищен патентом РФ № 2775419.

По данным металлографического и фазово-химического анализов, сплав ВКНА-1ВР – трехфазный и содержит, % (объемн.): 85–90 γ' -фазы (легированное соединение Ni_3Al); 5–10 прослоек γ -твердого раствора; 1,0–1,5 карбидов типа MeC и Me_2C (Mo_2C) (рис. 1, *a–в*); сплав ВКНА-1В – двухфазный и содержит, % (объемн.): 85–90 смеси фаз ($\gamma' + \gamma$) в осях дендритов; 5–10 γ -твердого раствора или ($\gamma + \beta$)-эвтектики в междендритных расстояниях.

Монокристаллический интерметаллидный сплав ВКНА-1В в осях дендритов имеет γ' -фазу кубоидной формы (рис. 1, *г–е*), если заготовки образцов отлиты с кристаллографической ориентацией [001], и треугольной (рис. 1, *ж–и*) – при КГО [111].

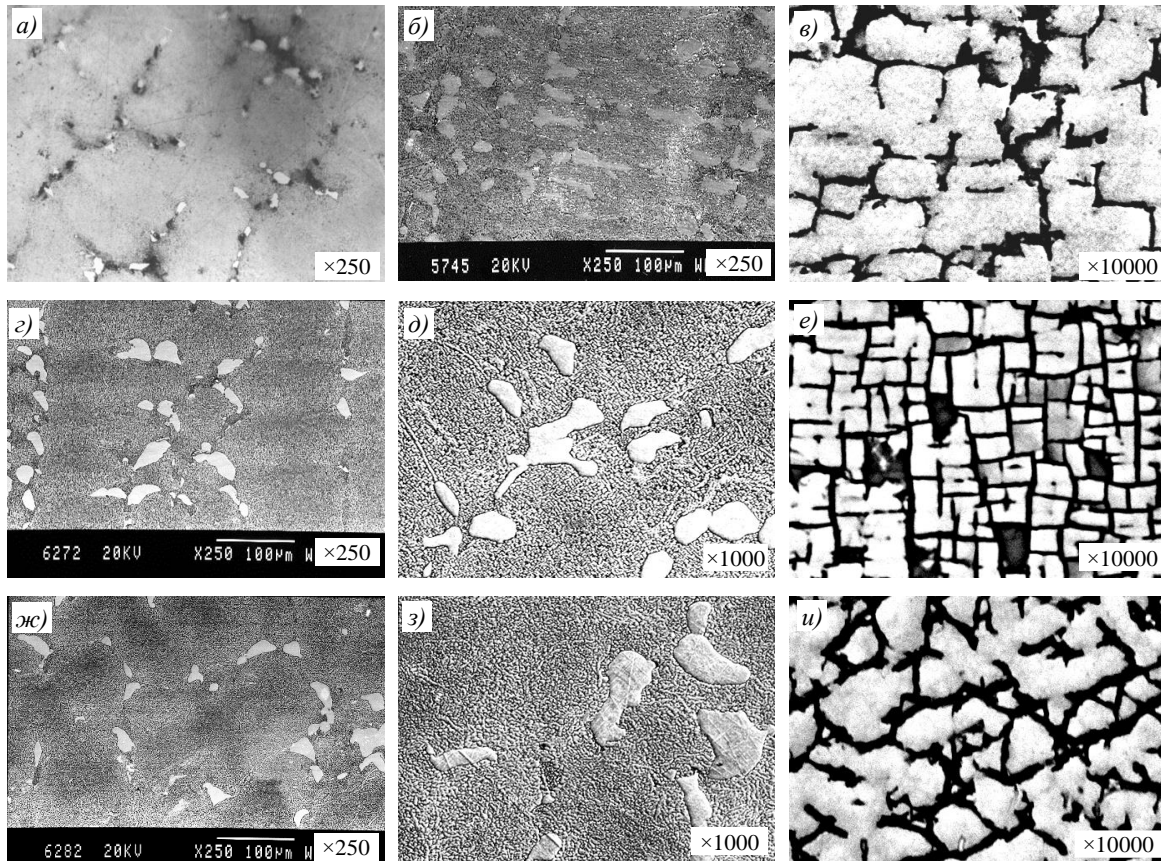


Рис. 1 Микроструктуры литых заготовок интерметаллидных сплавов (поперечное сечение): *а–в* – заготовки из сплава ВКНА-1ВР с равноосной поликристаллической структурой; *г–е* – заготовки из сплава ВКНА-1В Моно с КГО [001]; *ж–и* – заготовки из сплава ВКНА-1В Моно с КГО [111]

Проведены испытания образцов из сплава ВКНА-1ВР с поликристаллической структурой (табл. 2) и сплава ВКНА-1В с дендритной столбчатой структурой на растяжение при комнатной температуре и в интервале температур 900–1250 °С, а также на длительную прочность в интервале температур 900–1250 °С (табл. 3). Выявлено, что предел прочности при комнатной температуре на образцах с дендритной столбчатой (направленной) структурой превышает на 25 % аналогичную характеристику для образцов с поликристаллической структурой, а в диапазоне температур 900–1250 °С превосходство составляет от 6 до 55 %. Пределы жаропрочности на базе 100 ч (σ_{100}) в интервале температур от 900 до 1200 °С больше для сплава ВКНА-1В, полученного методом направленной кристаллизации, от 11 (900 °С) до 125 % (1200 °С) по сравнению со значениями для сплава ВКНА-1ВР с равноосной структурой (табл. 2 и 3). Проведя сравнение упругих механических характеристик и длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В с дендритной столбчатой и монокристаллической КГО [001] структурами, установили, что модули упругости имеют одинаковое значение ($E = 150$ ГПа) и оно меньше, чем на образцах с поликристаллической ($E = 198$ ГПа) (табл. 2–4) и монокристаллической КГО [111] структурами ($E = 220$ ГПа) (табл. 5). Значения кратковременной прочности при комнатной температуре на 34 % меньше для образцов с монокристаллической КГО [001] структурой, при 900 °С – меньше на 48,8 % для образцов с дендритной столбчатой структурой, при 1000 и 1100 °С – меньше только на 8 и 7,5 % соответственно. Пределы длительной прочности у монокристаллических образцов с КГО [001] на базе 100 ч (σ_{100}) при температуре 900 °С больше на 30,6 %, при температуре 1000 °С – всего на 7,4 %, при

1100 °С – на 38,4 %. Если сопоставлять показатели по пределам прочности и пределам длительной прочности монокристаллических образцов с КГО [001] и [111] (табл. 4 и 5), то картина складывается неоднозначная: модуль упругости в интервале температур 20–1000 °С максимальный для КГО [111] и превышает аналогичную характеристику для сплава с КГО [001] соответственно от 46,7 % при 20 °С до 53,8 % при 900 °С и до 29,2 % при 1000 °С. Максимальный предел прочности при комнатной температуре для образцов с КГО [111] также превышает таковой для образцов с КГО [001] в ~2,5 раза (в 2,45 раза). Предел прочности при 800 °С сохраняется выше для образцов с КГО [111] – на 5,5 %, а уже при температурах 900, 1000 и 1100 °С предел прочности для образцов с КГО [001] больше соответственно на 24,8; 8 и 7,5 %, а при 1150 °С пределы имеют одинаковые значения. По длительной прочности у монокристаллических образцов с КГО [111] на базах 100 (σ_{100}) и 500 ч (σ_{500}) в диапазоне температур 800–1200 °С характеристики стабильно больше, чем для образцов с КГО [001].

Таблица 2

Средние значения механических характеристик и длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР

Характеристика	Значения характеристики при температуре испытания, °С						
	20	900	1000	1100	1150	1200	1250
Модуль упругости E , ГПа	198	133	125	127	93	94	65
Предел прочности σ_B , МПа	580	590	465	345	265	180	100
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	360	520	400	315	255	175	98
Относительное удлинение δ , %	5,0	6,1	4,7	4,2	3,9	2,3	3,7
Длительная прочность σ_{10} на базе 10 ч, МПа	–	360	145	65	45	35	20
Длительная прочность σ_{100} на базе 100 ч, МПа	–	220	40	40	30	20	–
Длительная прочность σ_{500} на базе 500 ч, МПа	–	145	25	25	20	–	–

Таблица 3

Средние значения механических характеристик и длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В с дендритной столбчатой структурой

Характеристика	Значения характеристики при температуре испытания, °С					
	20	900	1000	1100	1200	1250
Модуль упругости E , ГПа	150	135	120	–	–	–
Предел прочности σ_B , МПа	725	625	500	400	215	155
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	370	550	420	345	190	–
Относительное удлинение δ , %	59	32	31	35	28	29
Длительная прочность σ_{10} на базе 10 ч, МПа	–	390	255	115	70	22
Длительная прочность σ_{100} на базе 100 ч, МПа	–	245	135	65	45	15
Длительная прочность σ_{500} на базе 500 ч, МПа	–	185	90	45	30	–

Таблица 4

Средние значения механических характеристик и длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В [001]

Характеристика	Значения характеристики при температуре испытания, °С					
	20	800	900	1000	1100	1150
Модуль упругости E , ГПа	150	–	130	120	–	–
Предел прочности σ_B , МПа	540	825	930	540	430	380
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	325	745	910	530	420	360
Относительное удлинение δ , %	30	14	43	44	31	35
Длительная прочность σ_{10} на базе 10 ч, МПа	–	560	–	265	135	108
Длительная прочность σ_{100} на базе 100 ч, МПа	–	470	320	145	90	55
Длительная прочность σ_{500} на базе 500 ч, МПа	–	410	–	90	60	34

Средние значения механических характеристик и длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В[111]

Характеристика	Значения характеристики при температуре испытания, °С						
	20	800	900	1000	1100	1150	1200
Модуль упругости E , ГПа	220	215	200	155	–	–	–
Предел прочности σ_b , МПа	1325	870	745	510	400	380	225
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	610	655	560	420	335	340	215
Относительное удлинение δ , %	14	26	25	30	22	–	24
Длительная прочность σ_{10} на базе 10 ч, МПа	–	615	460	285	135	135	90
Длительная прочность σ_{100} на базе 100 ч, МПа	–	520	355	195	100	90	50
Длительная прочность σ_{500} на базе 500 ч, МПа	–	460	285	150	75	60	30

При технологическом опробовании интерметаллидных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В в двух кристаллографических ориентациях [001] и [111] получены партии отливок сопловых лопаток турбины высокого давления (ТВД), микроструктура которых представлена на рис. 2. Изготовление монокристаллических отливок сопловых лопаток проводили методом направленной кристаллизации в вакуумной установке, внутри которой размещены плавильный индукционный тигель, печь подогрева форм, ванна с жидкометаллическим охладителем (алюминий или олово), многослойные экраны, отделяющие зону нагрева от зоны охлаждения. Расплавленный в плавильном индукционном тигле металл заливали при температуре $(T_L + (180 \div 200))$ °С в керамические формы с размещенными в них затравками заданной кристаллографической ориентации. Температура в печи подогрева форм по стационарным термопарам на верхнем и нижнем нагревателях составляла $(T_L + (150 \div 170))$ °С, температура в ванне с жидкометаллическим охладителем – $(T_L - (1060 \div 1080))$ °С. При получении отливок сопловых лопаток турбины с поликристаллической структурой методом точного литья по выплавляемым моделям расплавленный в индукционном тигле металл заливают в интервале температур $(T_L + (120 \div 140))$ °С в керамические формы, нагретые до температуры 900–950 °С.

Методом растровой электронной микроскопии изучена микроструктура отливок сопловых лопаток из интерметаллидных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В. Результаты анализа микроструктуры дали основание полагать, что исследованная структура отливок соответствует структуре заготовок образцов упомянутых сплавов. Так, отливки имеют традиционное дендритно-ячеистом строение: оси дендритов представляют собой легированную γ' -фазу в оболочке γ -твердого раствора на основе никеля, междендритные области состоят из глобулей γ' -фазы эвтектического происхождения и других фаз. Например, для сплава ВКНА-1ВР – это карбидные фазы MeC и Me₂C (Mo₂C). Технологическое опробование интерметаллидных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В при отливке заготовок сопловых лопаток ТВД в керамические оболочковые формы методами точного литья для получения равноосной и монокристаллической структур лопаток прошло с положительным эффектом с выходом годного ~75 % во всех трех случаях. Отметим, что литье монокристаллических заготовок сопловых лопаток осуществляли методом направленной кристаллизации с применением монокристаллических заготовок с КГО [001] и [111].

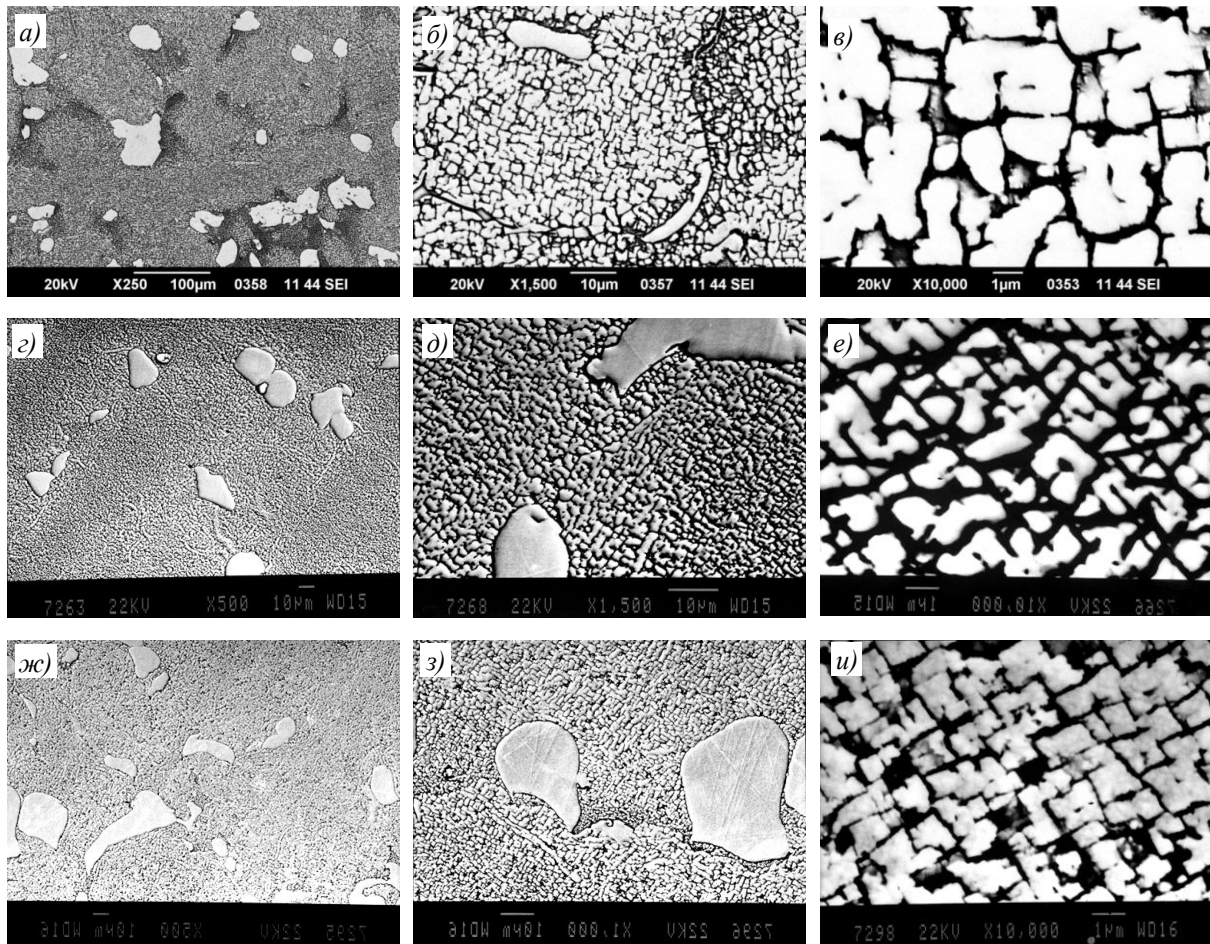


Рис. 2. Микроструктуры отливок сопловых лопаток из интерметаллидных сплавов ВКНА-1ВР и ВКНА-1В: *а-в* – перо лопатки (поперечный шлиф) из сплава ВКНА-1ВР; *г-е* – перо лопатки (поперечный шлиф) из сплава ВКНА-1В с КГО [111]; *ж-и* – перо лопатки (поперечный шлиф) из сплава ВКНА-1В с КГО [001]; *а, г, ж* – общий вид; *б, д, з* – вид эвтектической фазы; *в, е, и* – оси дендритов первого порядка, размер и форма γ' -фазы

Интерметаллидный сплав ВКНА-1ВР прошел также эксплуатационное опробование в качестве сопловых лопаток турбины высокого давления второй ступени с положительным эффектом в течение >350 ч. Микроструктурный анализ методом РЭМ установил, что структура сопловых лопаток после наработки сохраняет дендритно-ячеистое строение, в осях дендритов первого порядка на входной и выходной кромках, на спинке и корыте лопатки отмечено укрупнение и слияние частиц γ' -фазы в осях дендритов первого порядка (рис. 3, *а, б*) и междендритных областях. В междендритном пространстве, наряду с γ' -фазой эвтектического происхождения, в зонах с частично сохранившимися прослойками γ -твердого раствора наблюдаются также выделения дисперсных частиц вторичной γ' -фазы (рис. 3, *в*). Сравнительное исследование микроструктуры сечения лопатки после наработки с микроструктурой образцов из сплава ВКНА-1ВР, подвергнутых испытаниям на длительную прочность, показали идентичность структур. При этом объемное содержание прослоек γ -твердого раствора в микроструктуре образцов после испытаний при температуре 1250 °С больше, чем после наработки, что позволяет косвенно оценить температурный диапазон испытаний сопловых лопаток – длительно при температуре 1250 °С или >1250 °С кратковременно (рис. 3, *б, д*).

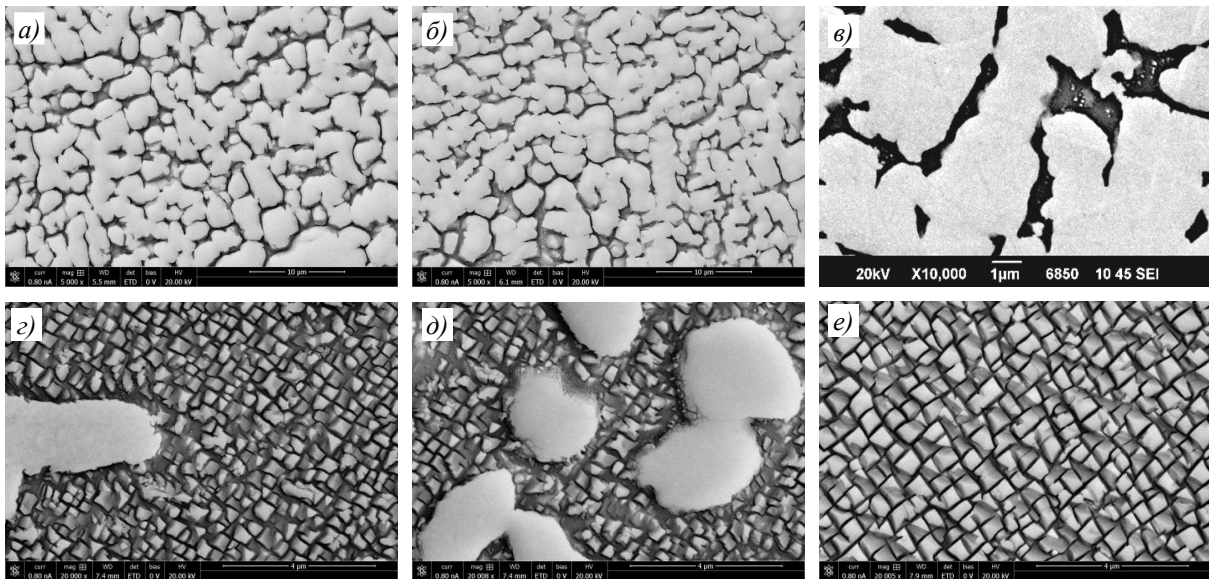


Рис. 3. Микроструктуры сопловой лопатки из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР после наработки (*а–в*) и образцов из сплава ВКНА-1ВР, прошедших испытания на длительную прочность: *а* – входная кромка лопатки; *б* – выходная кромка лопатки; *в* – спинка лопатки; длительные испытания при температурах 1150 (*з*), 1250 (*д*) и 1300 °С (*е*)

Выводы

В качестве альтернативы разработчики высокотемпературных интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni_3Al предлагают провести эксплуатационное опробование отливок сопловых лопаток турбины высокого давления второй ступени с монокристаллической структурой с КГО [001], поскольку модуль упругости в этом направлении меньше, чем с КГО [111] и термоусталостные напряжения будут накапливаться в меньшей степени, а уровень жаропрочности также имеет высокие значения.

Список источников

1. Портной К.И., Бунтушкин В.П., Богданов В.И. и др. Влияние легирования на термодинамическую стабильность фаз в системе $Ni-Al$ // Доклады АН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 209–214.
2. Кишкин С.Т., Портной К.И., Бунтушкин В.П. и др. Теоретические исследования жаропрочных никелевых и интерметаллидных материалов // Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ, 1982. С. 27–34.
3. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: Изд-во Ин-та физики металлов УрО РАН, 2002. 359 с.
4. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Бунтушкин В.П. Особолегкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе Ni_3Al для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения // Вопросы материаловедения. 2008. № 2 (54). С. 85–93.
5. Wahl J.B., Harris K. New Single crystal superalloys, CMSX-7 and CMSX-8 // Superalloys 2012. Cham: Springer Nature, 2012. P. 179–188.
6. Петрушин Н.В., Епишин А.И., Светлов И.Л., Нольце Г., Елютин Е.С., Соловьев А.Е. Влияние знака γ/γ' -мисфита на структуру и длительную прочность монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Материаловедение. 2022. № 2. С. 21–31.
7. Чабина Е.Б., Петрушин Н.В., Филонова Е.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н. Эволюция структуры и фазового состава материала рабочих лопаток из сплава ЖС32 в результате воздействия эксплуатационных факторов // Новые материалы и технологии переработки сырья – основа инновационного развития России: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. М., 2022. С. 85–97.

8. Битюцкая О.Н., Петрушин Н.В., Рассохина Л.И., Авдеев В.В. Литье турбинных лопаток из жаропрочного никелевого сплава нового поколения ВЖЛ21 с поликристаллической структурой // Климовские чтения–2024: Перспективные направления развития авиадвигателестроения: сб. ст. науч.-техн. конф. СПб, 2024. С. 373–381.
9. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Бунтушкин В.П. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al перспективный материал для лопаток турбин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 15–20.
10. Поварова К.Б. Физико-химические принципы создания термически стабильных сплавов на основе переходных металлов // Материаловедение. 2007. № 12. С. 20–27.
11. Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Буркина В.И. Высокотемпературные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al для деталей горячего тракта ГТД // Авиационная промышленность. 2007. № 2. С. 41–43.
12. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Конструкционные жаропрочные материалы на основе соединения Ni_3Al для деталей горячего тракта ГТД // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 75–80.
13. Wufeng D., Tietao Zh., Heli L. et al. Effects of hafnium and yttrium on the oxidation resistance of $Ni_3Al/CrMoV$ alloy // Rare Metal Materials and Engineering. 2008. No. 37. P. 1549.
14. Степанова Н.Н., Ринкевич А.Б., Митрохин Ю.С. Физические свойства Ni_3Al , легированного третьим элементом, эксперимент и моделирование. Екатеринбург: Изд-во Ин-та физики металлов УрО РАН, 2010. 175 с.
15. 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.
16. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104–115.
17. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Echin A.B., Shestakov A.V. Influence mickoalloying with rare earch metals and production technology of structural intermetallidy alloy based on nickel aluminide on alloy properties // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 14–20.
18. Дроздов А.А., Поварова К.Б., Базылева О.А. и др. Интерметаллидные сплавы на основе γ/Ni_3Al . Часть I. Особенности строения, формирования ($\gamma'+\gamma$) структур и легирования // Перспективные материалы. 2023. № 9. С. 5–25.
19. Структура и свойства интерметаллидных материалов с наночастицами / под ред. Е.Н. Каблова и Ю.Р. Колобова. М.: Изд. дом МИСиС, 2008. 327 с.
20. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов // Металлург. 2012. № 5. С. 26–30.
21. Сидоров В.В., Каблов Е.Н., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технологии и оборудование / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2016. С. 280–285.
22. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя // Литейное производство. 2011. № 5. С. 36–39.
23. 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. 82–98
24. Кузьмина Н.А., Лифшиц В.А., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. Специфика применения рентгеновских методов «качания» и Лауэ при оценке качества структуры отливок никелевых жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2021. № 8 (102). С. 75–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-75-83.
25. Яковлев Е.И. Получение отливок из жаропрочных никелевых сплавов с мелкозернистой равноосной структурой и пониженной пористостью // Литейное производство. 2022. № 6. С. 3–6.
26. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Получение мелкозернистой структуры из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

27. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. Развитие технологий и оборудования для получения лопаток горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурой // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). С. 3–14. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.
28. 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: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
29. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Мин М.Г. Разработка и освоение в производстве нового монокристаллического высокожаропрочного никелевого сплава для литья турбинных лопаток перспективного двигателя ПД-8 // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 3–17. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
30. Морозова Г.И. Роль электронного и размерного факторов в самоорганизации γ' -фазы и ее стабильности // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 288. № 6. С. 1415–1418.
31. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 12. С. 52–58.
32. Алексеев А.В., Якимович П.В. Применение метода масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом в анализе никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 101–108. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-101-108.
33. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Чабина Е.Б. и др. Влияние примесей и микролегирования на структуру и эксплуатационные свойства монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. С. 98–105.
34. Ходинев И.А., Монин С.А., Горбовец М.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВКНА-1ВР // Физико-механические испытания, прочность и надежность конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». М., 2022. С. 41–64.

References

1. Portnoy K.I., Buntushkin V.P., Bogdanov V.I. et al. Influence of Alloying on the Thermodynamic Stability of Phases in the Ni–Al System. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1980, vol. 252, no. 1, pp. 209–214.
2. Kishkin S.T., Portnoy K.I., Buntushkin V.P. et al. Theoretical Research of High-Temperature Nickel and Intermetallic Materials. *Aviation Materials*. Moscow: ONTI VIAM, 1982, pp. 27–34.
3. Grinberg B.A., Ivanov M.A. *Ni₃Al and TiAl intermetallides: microstructure, deformation behavior*. Ekaterinburg: Publ. House of Institute of Metal Physics UB of RAS, 2002, 359 p.
4. Povarova K.B., Drozdov A.A., Buntushkin V.P. Special-Light High-Temperature Nanostructured Ni₃Al-Based Alloys for Aviation Engine and Power Engineering. *Voprosy materialovedeniya*, 2008, no. 2 (54), pp. 85–93.
5. Wahl J.B., Harris K. New Single crystal superalloys, CMSX-7 and CMSX-8. *Superalloys 2012*. Cham: Springer Nature, 2012, pp. 179–188.
6. Petrushin N.V., Epishin A.I., Svetlov I.L., Nolze G., Elutin E.S., Solovyov A.E. Influence of sign γ/γ' -misfit on the structure and long-term strength of single crystals of nickel heat-resistant alloys. *Materialovedenie*, 2022, no. 2, pp. 21–31.
7. Chabina E.B., Petrushin N.V., Filonova E.V., Yelutin E.S., Raevsky A.N. Evolution of the structure and phase composition of the material of working blades made of ZhS32 alloy as a result of operational factors. *New materials and technologies for processing raw materials – the basis of innovative development of Russia: Materials of the III Int. Sc. and Tech. Conf. Moscow, 2022*, pp. 85–97.

8. Bityutskaya O.N., Petrushin N.V., Rassokhina L.I., Avdeev V.V. Casting of turbine blades from a new generation of heat-resistant nickel alloy VZhL21 with a polycrystalline structure. *Klimov readings-2024: Promising directions for the development of aircraft engine building*: coll. of articles of a sc. and tech. conf. St. Petersburg, 2024, pp. 373–381.
9. Kablov E.N., Lomberg B.S., Buntushkin V.P. Intermetallic alloy Ni₃Al a promising material for turbine blades. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 7, pp. 15–20.
10. Povarova K.B. Physical and Chemical Principles of Creating Thermally Stable Alloys Based on Transition Metals. *Materialovedenie*, 2007, no. 12, pp. 20–27.
11. Buntushkin V.P., Bazyleva O.A., Burkina V.I. High-temperature heat-resistant alloys based on intermetallic Ni₃Al for parts of the hot path of the gas turbine engine. *Avaitzionnaya promyshlennost*, 2007, no. 2, pp. 41–43.
12. Kablov E.N., Buntushkin V.P., Bazyleva O.A. Structural heat-resistant materials based on the Ni₃Al compound for hot-path parts of gas-turbine engines. *Tekhnologiya legkih splavov*, 2007, no. 2, pp. 75–80.
13. Wufeng D., Tietao Zh., Heli L. et al. Effects of hafnium and yttrium on the oxidation resistance of Ni₃Al/ CrMoB alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, no. 37, p. 1549.
14. Stepanova N.N., Rinkievich A.B., Mitrokhin Yu.S. *Physical Properties of Ni₃Al Alloyed with a Third Element: Experiment and Modeling*. Ekaterinburg: Publ. House of Institute of Metal Physics UB of RAS, 2010, 175 p.
15. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al Based Intermetallic Alloys—Current Stage and Potential Perceptivities. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 2537–2568.
16. Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., Arginbaeva E.G., Letnikova E.Yu., Shestakov A.V. Development trends of nickel-based intermetallic alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
17. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Echin A.B., Shestakov A.V. Influence mickoalloying with rare earch metals and production technology of structural intermetallidy alloy based on nickel aluminide on alloy properties. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 14–20.
18. Drozdov A.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A. et al. Intermetallic alloys based on γ' Ni₃Al. Part I. Peculiarities of structure, formation ($\gamma'+\gamma$) of structures and alloying. *Perspektivnye materialy*, 2023, no. 9, pp. 5–25.
19. *Structure and Properties of Intermetallic Materials with Nanophase Hardening*. Eds. E.N. Kablov, Yu.R. Kolobov. Moscow: MISIS Publ. House, 2008, 327 p.
20. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Kablov D.E. High-Efficiency technologies and modern equipment for the production of foundry blanks from heat-resistant alloys. *Metallurg*, 2012, no. 5, pp. 26–30.
21. Sidorov V.V., Kablov E.N., Rigin V.E. *Metallurgy of foundry heat-resistant alloys: technologies and equipment*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2016, pp. 280–285.
22. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. On the Directed Crystallization of Heat-Resistant Alloys Using a Cooler. *Liteynoe proizvodstvo*, 2011, no. 5, pp. 36–39.
23. 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. 82–98.
24. Kuzmina N.A., Lifshitz V.A., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. Specificity of application of x-ray methods of «swing» and Laue in determining the quality of the structure of castings of nickel heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), pp. 75–83. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-75-83.
25. Yakovlev E.I. Production of castings from heat-resistant nickel alloys with fine-grained equiaxial structure and reduced porosity. *Liteynoe proizvodstvo*, 2022, no. 6, pp. 3–6.
26. Narsky A.R., Deynega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

27. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. Development of technologies and equipment for producing blades of the hot path of gas turbine engines from superalloys with directional and single-crystal structure. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 3–14. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-07-3-14.
28. 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: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
29. Min P.G., Vadeev V.E., Min M.G. Development and implementation in production of the new single-crystal high-temperature nickel alloy for casting of gas turbine blades for the prospective engine PD-8. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 3–17. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
30. Morozova G.I. The Role of Electronic and Dimensional Factors in the Self-Organization of the γ -Phase and Its Stability. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1986, vol. 288, no. 6, pp. 1415–1418.
31. Morozova G.I. Compensation of Alloying Imbalance in Heat-Resistant Nickel Alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 12, pp. 52–58.
32. Alekseev A.V., Yakimovich P.V. Application of the glow discharge high resolution mass spectrometry method in analysis of nickel alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp. 101–108. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-101-108.
33. Sidorov V.V., Kablov D.E., Chabina E.B. et al. *Influence of Impurities and Microalloying on the Structure and Performance Properties of Single Crystals of High-Temperature Nickel Alloys*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, pp. 98–105.
34. Khodinev I.A., Monin S.A., Gorbovets M.A. Research of the Characteristics of Low-Cycle Fatigue of the Heat-Resistant Nickel Alloy VKNA-1VR. *Physical and Mechanical Tests, Strength, and Reliability of Structural and Functional Materials: Materials of the XIV All-Rus. Conf. on Testing and Research of Material Properties «TestMat»*. Moscow, 2022, pp. 41–64.

Информация об авторах

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

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

Луцкая София Алексеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Артеменко Юлия Вячеславовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Sofia A. Lutskaya, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Julia V. Artemenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.12.2025.
The article was submitted 18.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 24.12.2025.