
Научная статья

УДК 669.017.165

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-3-15

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВИН4М-ВИ ПРИ ЛИТЬЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

Е.М. Висик¹, Е.В. Колядов¹, Н.А. Кузьмина¹

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

Аннотация. Рассмотрены направления разработки литейных блоков заготовок малоразмерных сопловых лопаток для литья на установке УВНК-9А и влияние условий технологического процесса направленной кристаллизации на формирование монокристаллической структуры интерметаллидного никелевого сплава ВИН4М-ВИ с кристаллографической ориентацией (КГО) [001]. Приведены результаты рентгеноструктурных и металлографических исследований заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ, подтверждающие возможность получения в них монокристаллической структуры КГО [001] и результаты опробования этого сплава в опытном и серийном производстве.

Ключевые слова: интерметаллидные никелевые сплавы, направленная кристаллизация, установки для монокристаллического литья, монокристаллические сопловые лопатки, микроструктура

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-3-15.

Scientific article

INFLUENCE OF DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PARAMETERS ON THE STRUCTURE OF THE INTERMETALLIC NICKEL ALLOY VIN4M-VI WHEN CASTING SINGLE-CRYSTAL BLANKS OF NOZZLE BLADES

Е.М. Visik¹, Е.В. Kolyadov¹, N.A. Kuzmina¹

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 directions of the development of casting blocks for casting small-sized blanks of nozzle blades at the UVNK-9A installation and the influence of the conditions of the technological process of directed crystallization on the formation of the single-crystal structure of the intermetallic alloy VIN4M-VI of KGO [001] are considered. The results of X-ray diffraction and metallographic studies of blanks of nozzle blades made of nickel alloy VIN4M-VI are presented, confirming the possibility of obtaining a single-crystal structure in them KGO [001], and the results of testing this alloy in pilot and serial production.

Keywords: intermetallic nickel alloys, directional crystallization, installations for single-crystal casting, single-crystal nozzle blades, microstructure

For citation: Visik E.M., Kolyadov 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-3-15.

Введение

Научные проблемы, изложенные в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», предполагают создание как новых перспективных материалов, так и новых высокотехнологичных процессов с использованием инновационных концепций для их реализации [1].

Интерметаллидные никелевые сплавы (ИНС) типа ВКНА на основе интерметаллида Ni_3Al в отличие от жаропрочных никелевых сплавов экономнолегированы, имеют меньшую плотность, содержат до 90 % (объемн.) γ' -фазы и ~10 % (объемн.) γ -фазы с гранцентрированной кубической решеткой. Такие сплавы разработаны для литья сопловых и рабочих лопаток турбин, створок, проставок, элементов камеры сгорания, длительно эксплуатируемых при температурах 900–1200 °С. Кроме того, литейные ИНС обладают высокой пластичностью (30–50 %) и термостабильностью фазового состава почти до температур плавления [2–5].

Монокристаллические отливки из сплавов типа ВКНА имеют более высокие уровни сопротивления температурной усталости и жаропрочности при литье с аксиальной кристаллографической ориентацией (КГО) [111], поэтому рекомендованы для литья неохлаждаемых рабочих и сопловых лопаток и других деталей газотурбинных двигателей [6].

Новое поколение ИНС серии ВИН (ВИН2, ВИН3, ВИН4), разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ), содержит тугоплавкие элементы: Та – до 6,0 % и Ре – от 0,5 до 2,5 %; имеет более высокую жаропрочность при литье с монокристаллической структурой КГО [001] при температуре испытаний 1100 °С на базе 1000 ч [6].

Ранее разработаны технологии литья на установках типа УВНК с температурным градиентом на фронте кристаллизации 60–80 °С/см монокристаллических маломерных заготовок рабочих лопаток вертолетного двигателя из низкоплотного сплава ВЖМ7-ВИ с КГО [001], заготовок рабочих лопаток наземных установок из сплава ВКНА-4У с КГО [111], заготовок рабочих лопаток типа «блиск» перспективного вертолетного двигателя из сплава ВКНА-25 с КГО [111] и др., изготовление которых опробовано в серийном производстве [7–13].

Новый ИНС марки ВИН4М-ВИ плотностью 8,13 г/см³ благодаря сбалансированному составу системы легирования (Ni–Al–Cr–W–Mo–Ti–Ta–Re) обладает улучшенными эксплуатационными характеристиками, в том числе высокой коррозионной стойкостью. Сплав рекомендован для отливок с монокристаллической структурой КГО [001] сопловых лопаток и других деталей газотурбинных двигателей, работающих при температурах до 1200 °С [14], но пока не опробован в опытно-промышленных условиях. Для освоения нового сплава в производстве наряду с требованиями к рабочим характеристикам ИНС предъявляются требования к технологичности, что требует дополнительных исследований технологических режимов литья и структуры получаемых отливок [14, 15].

В данной работе приведены результаты исследования отливок с монокристаллической структурой КГО [001] модельных сопловых лопаток малоразмерного двигателя из сплава ВИН4М-ВИ и опробования их получения в серийном производстве.

Материалы и методы

Технология заливки блоков сопловых лопаток малогабаритного двигателя сплавом ВИН4М-ВИ в опытном и серийном производстве реализована на литейных установках для направленной кристаллизации УВНК-9А с автоматизированной системой управления процессом (с жидкометаллическим охлаждением).

Для плавки использовали шихтовые заготовки сплава ВИН4М-ВИ паспортного состава, полученные в вакуумной индукционной печи. Содержание примесей в сплаве составляет, % (по массе):

[C]	[S]	[O]	[N]
0,003	0,0010	0,0010	0,0003

Микроструктуру ИНС исследовали методом растровой электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-Max. Для получения информации об элементном составе и распределении фаз в материале использовали режим обратноотраженных электронов.

Расстояние между осями дендритов, объемную долю и размеры литейных пор, объемную долю эвтектики в отливках сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ, полученных в опытном и серийном производстве, определяли методами оптической количественной металлографии на протравленных шлифах с помощью стереомикроскопа фирмы Leica.

Кристаллографическую ориентацию отливок сопловых лопаток турбины изучали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-4 и методом Лауэ на рентгенодифракционной установке ПРДУ в автоматическом режиме.

Результаты и обсуждение

Геометрические размеры пера и полок сопловых лопаток могут соотноситься как 1:(4–5), поэтому для литья методом направленной кристаллизации важно оценивать возможность роста монокристаллической структуры сплава в поперечном направлении. Для оценки технологичности нового ИНС для заготовок сопловых лопаток, в частности величины прорастания монокристаллической структуры с КГО [001] в поперечном направлении, предварительно проведены плавки с использованием модельного блока простой формы, который имитирует блок лопаток в виде пластины – пера с несколькими выступами в радиальном направлении длиной 20 мм с каждой стороны, повторяющими расположение полок в многоярусном модельном блоке (рис. 1). Изготовленные керамические формы заливали сплавом ВИН4М-ВИ на литейной установке УВНК-9А и проводили направленную кристаллизацию для исследования вероятности формирования посторонних зерен на фронтальных выступах.

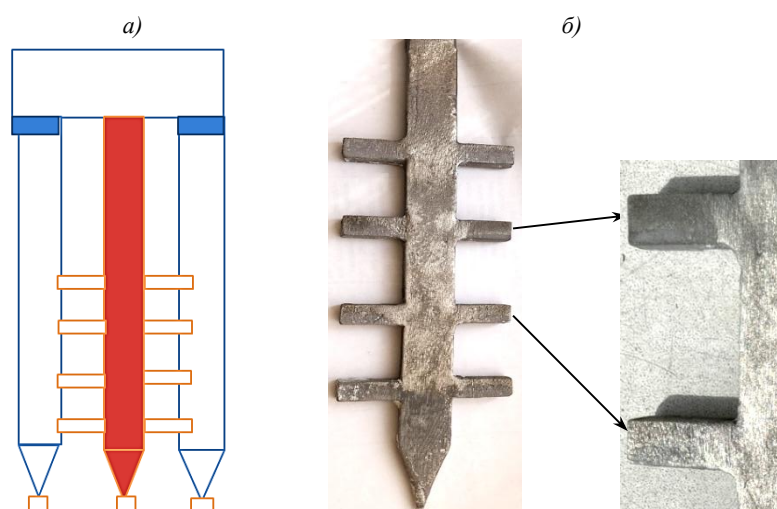


Рис. 1. Модельный блок образцов для оценки технологичности (а) и макроструктура сплава ВИН4М-ВИ в отливке с имитацией полок лопатки (б)

Как показало исследование макроструктуры после травления (рис. 1, б), отливка в виде пластины имеет монокристаллическую структуру от монокристаллической затравки в направлении [001]. Структура выступов в радиальном направлении формируется ветвями дендритов второго порядка в направлении [010], а от них – в направлении [001] ветвями дендритов третьего порядка. Лишь на одном поперечном выступе постороннее зерно проросло на $\sim 1/3$ длины со стороны стенки формы вследствие образования переохлажденной зоны в одном из выступов. Для зарождения постороннего зерна сплава необходима невысокая (обычно на 10–20 °С) степень переохлаждения расплава [15]. Снижению вероятности переохлаждения удаленных точек отливки при кристаллизации, связанной с кривизной линии изоликвидус сплава, обычно способствует улучшение теплоизоляции зон нагрева и охлаждения, а также установка кристаллопроводов, утеплителей и другие мероприятия. Проведенный эксперимент подтверждает технологичность сплава ВИН4М-ВИ на уровне серийных отечественных ИНС.

Для отработки технологии литья на установке УВНК-9А монокристаллических заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ использовали восковые модели сопловых лопаток малоразмерного двигателя перспективного многоцелевого вертолета. При небольших размерах (высота ≤ 40 мм) модели заготовок лопаток принято собирать в двух- и трехъярусные секции с общим стартовым основанием и затравкой [11, 16]. Когда основная ось лопаток Z совпадает с направлением кристаллизации, стартовая часть секции состоит из двух конусов на сторонах полки каждой нижней лопатки блока, соединяющихся под углом ~ 60 градусов в общий затравочный узел с затравкой. Монокристаллическая структура передается от нижней (малой) полки к верхней (большой). Аналогичным образом монокристаллическая структура передается к соосно расположенным лопаткам второго и третьего ярусов. По результатам оценки технологичности сплава во избежание переохлаждения на удаленных от оси лопатки точках полки в блоке предусмотрена установка кристаллопроводов в виде прутков малого диаметра в углах полки.

Опробован второй вариант сборки моделей сопловых лопаток с наклоном на 40–45 градусов относительно основной оси блока. Ось стартового основания с затравкой каждой секции также совпадала с главной осью сопловой лопатки Z . Однако такой вариант сборки был усложнен операциями сборки моделей и последующей резки блока отливок. Для промышленного опробования выбран первый вариант сборки блоков.

По полученным модельным блокам, содержащим 4 или 6 сопловых лопаток, изготовлены керамические формы на основе фракций электрокорунда с добавками АСД4 по серийной технологии для направленной кристаллизации, в которые перед плавкой устанавливали монокристаллические затравки из сплава Ni–W с отклонением их КГО от [001] не более 5 градусов (рис. 2, а, б).

Опробование технологии литья заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ с монокристаллической структурой КГО [001]

Экспериментальные плавки проводили на литейных установках УВНК-9А промышленного назначения с автоматизированной системой управления. Для выбора температурно-скоростных режимов использовали опыт получения малоразмерных монокристаллических рабочих и сопловых лопаток турбин из жаропрочных сплавов и ИНС [11, 14, 16, 17] на установках типа УВНК. По данным дифференциального термического анализа сплава ВИН4М-ВИ температура солидус составляет 1309 °С, температура ликвидус: 1384 °С. Керамические блоки форм заготовок сопловых лопаток заливали сплавом ВИН4М-ВИ при перегреве расплава на 200–250 °С выше температуры ликвидус, скорость кристаллизации сплава при литье заготовок сопловых лопаток снижали с 6 до 3–4 мм/мин.

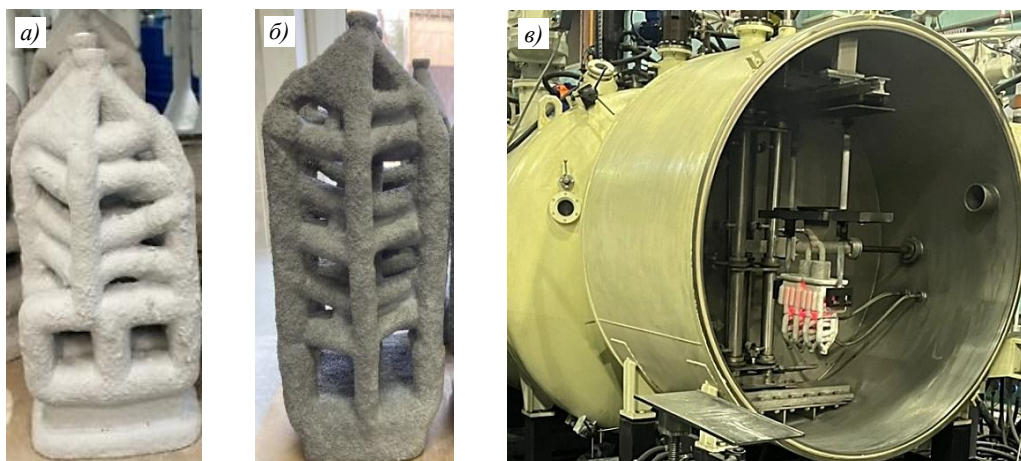


Рис. 2. Экспериментальные конструкции двух- и трехъярусного блоков форм (а, б) и технологическое опробование литья в серийном производстве заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ с монокристаллической структурой КГО [001] на установке УВНК-9А (в)

Основными требованиями к макроструктуре были отсутствие границ зерен на всей поверхности отливки сопловой лопатки и отклонение монокристаллической структуры от заданной КГО [001] не более 10 градусов.

Исследование макроструктуры партии отливок, полученных в ВИАМ, показало, что при скорости кристаллизации сплава 6 мм/мин монокристаллическую структуру заданной ориентации [001] имели ~50 % экспериментальных отливок сопловых лопаток. При скорости кристаллизации 4 мм/мин все полученные отливки визуально имели монокристаллическую структуру заданной ориентации [001], на ~25 % отливок наблюдали фрагментированную структуру. Изменение температуры заливки расплава в выбранном диапазоне существенно не влияло на структуру отливок. Отработанные режимы литья обеспечивают выход годных заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ, имеющих монокристаллическую структуру с отклонением не более 10 градусов от заданной КГО [001], на уровне 75 %. Режимы рекомендованы для серийного производства при отливке опытной партии заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ.

Исследование кристаллографической ориентации отливок сопловых лопаток

Исследование и контроль КГО отливок проводили сначала визуально по следам травления в растворе соляной кислоты и перекиси водорода.

Методом рентгеноструктурного анализа отклонение структуры сплава от КГО [001] определяли на стартовых конусах сопловых лопаток, отрезанных от отливок заготовок, визуально не имеющих границ зерен. Полученные результаты показали, что стартовые конусообразные основания, вертикальные цилиндрические кристалловоды и сами отливки сопловых лопаток, отлитые из сплава ВИН4М-ВИ при выбранных оптимальных технологических режимах, имеют монокристаллическую структуру с отклонением от КГО [001] не более 10 градусов.

Затем на выбранных отливках, имеющих монокристаллическую структуру (визуально и по результатам определения КГО на конусах), определяли отклонения структуры от заданной КГО [001] ($\alpha_{[001]}$) в разных точках поверхности отливки методом Лауэ. Метод позволяет исследовать изменение структурных характеристик в отливке в интересующих направлениях криволинейной поверхности полок (от центра к краю) и получить дифракционную картину – лауэграмму – для каждой точки [18–20].

При съемке методом Лауэ на рентгеновской установке ПРДУ неподвижный объект облучали полихроматическим пучком острофокусной рентгеновской трубки, площадь облучения составляла $0,4 \text{ мм}^2$.

На рис. 3 показана макроструктура полков отливок сопловых лопаток нижнего яруса (2Н и 5Н) из сплава ВИН4М-ВИ и точки определения аксиальной КГО, на рис. 4 – пример определения КГО методом Лауэ в одной из указанных точек поверхности полки.

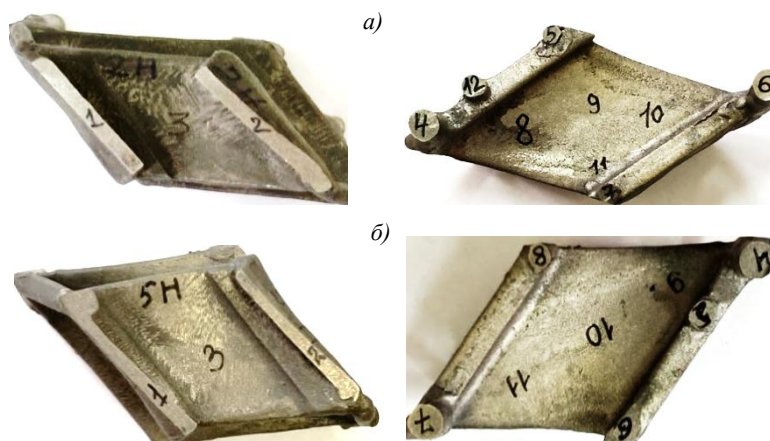


Рис. 3. Макроструктура полков отливок сопловых лопаток 2Н (а) и 5Н (б) и точки определения аксиальной КГО на поверхности полков отливок

Результаты определения отклонений КГО структуры сплава ВИН4М-ВИ от направления $[001]$ в разных точках поверхности полки, элементах литниковой системы блока лопаток (срезов стартовых конусов, цилиндрических кристалловодов) и отливок сопловых лопаток представлены в табл. 1. Выбранные заготовки лопаток не имели видимых границ.

Таблица 1

Отклонение КГО от направления $[001]$ структуры сплава ВИН4М-ВИ в разных точках отливки сопловых лопаток

Точка измерения	Отклонение направления роста от заданной КГО $[001]$, градусы, для лопатки		
	5Н*	2Н*	2В**
1 (срез стартового конуса)	5,4	2,1	–
2 (срез стартового конуса)	5,3	2,3	–
3 (центр малой полки)	5,2	2,0	–
4 (угол полки)	5,4	4,0	–
5 (кристалловод на полке)	5,6	3,9	–
6 (угол большой полки)	3,1	4,1	–
7 (угол большой полки)	3,2	–	–
8 (угол большой полки)	5,1	2,4	7,0
9 (верхняя полка)	5,6	3,4	6,0
10 (центр большой полки)	2,9	4,5	5,0
11 (угол большой полки)	3,4	45	–
12 (кристалловод на полке)	–	5,0	–

* Лопатка нижнего яруса в блоке форм.
 ** Лопатка верхнего яруса.

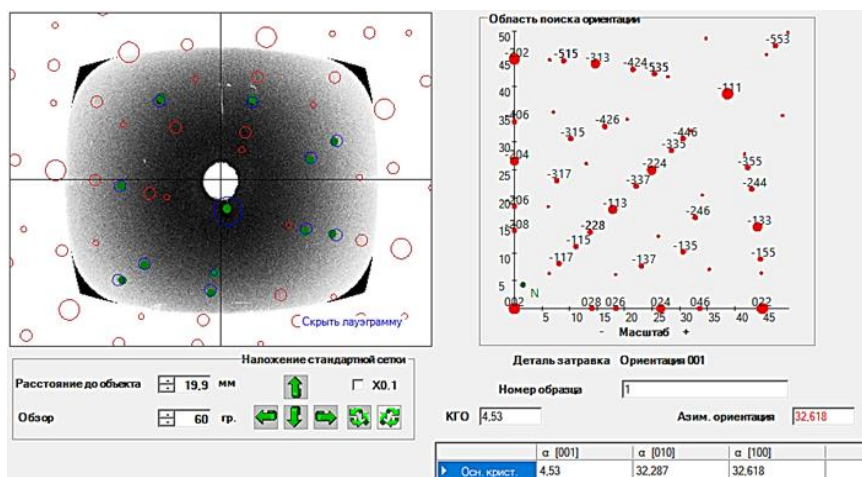


Рис. 4. Определение КГО в точке 10 на поверхности полки отливки лопатки 2Н

Исследования показали, что заготовки сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ имеют монокристаллическую структуру с заданной КГО [001]. Результаты измерений подтвердили формирование монокристаллической структуры КГО [001] во всех точках заготовок с разориентацией блоков структуры в направлении $\langle 001 \rangle$ на полке каждой лопатки не более 2,5–3,0 градусов, что входит в допуски отклонений КГО для сопловых лопаток. В точке 11 лопатки 2Н (рис. 3, а) кристалловод к углу одной из полок не предусмотрели, что привело к появлению постороннего кристалла с $\alpha_{[001]} = 45$ градусов (табл. 2).

**Исследование микроструктуры сплава ВИН4М-ВИ
в отливках сопловых лопаток**

К размерам структурных составляющих ИНС в литом состоянии предъявляют повышенные требования, во многом определяющие его механические свойства [21]. Проведены металлографические исследования методом оптической металлографии отливок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ в литом состоянии из опытной и производственной партий, полученных при одинаковых температурно-скоростных режимах литья на установках УВНК-9А.

Результаты количественного анализа материала отливок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ в литом состоянии, полученных в опытном производстве ВИАМ, представлены в табл. 2, в условиях серийного производства – в табл. 3.

Таблица 2

Средние значения размеров структурных составляющих в материале отливок лопаток из сплава ВИН4М-ВИ (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Заготовка сопловой лопатки		Объемная доля пор, %	Диаметр пор на 25 полях зрения, мкм	Длина пор на 25 полях зрения, мкм	Расстояние между осями дендритов первого порядка (λ_1), мкм
Нижний ярус блока	Входная кромка	0,008	3,8±0,3	5,1±0,4	281
	Выходная кромка	0,002	3,6±0,5	4,2±0,6	316
Верхний ярус блока	Входная кромка	–	–	–	319
	Выходная кромка	–	–	–	349

Средние значения размеров структурных составляющих в материале отливок лопаток из сплава ВИН4М-ВИ в литом состоянии (серийное производство)

Заготовка сопловой лопатки		Объемная доля пор, %	Диаметр пор на 25 полях зрения, мкм	Длина пор на 25 полях зрения, мкм	Объемная доля эвтектики на 5 полях зрения при $\times 100$, %	Расстояние между осями дендритов первого порядка (λ_1), мкм
Нижний ярус блока	Входная кромка	0,02	6,9 \pm 0,5	8,5 \pm 0,6	25,2	331
	Выходная кромка	0,01	5,8 \pm 0,8	7,1 \pm 1,1	26,8	312
Верхний ярус блока	Входная кромка	0,14	10,8 \pm 0,8	13,6 \pm 1,1	29,5	360
	Выходная кромка	0,06	10,2 \pm 0,7	12,8 \pm 0,9	27,3	370

Монокристаллическая структура сплава в пере отливки лопатки сформирована осями дендритов первого порядка КГО [001], а в полках – осями дендритов второго порядка (рис. 5). В материале отливок лопаток опытного производства ВИАМ расстояние между осями дендритов первого порядка равно 281–316 мкм в отливках сопловых лопаток нижнего яруса блока и 319–349 мкм – в отливках верхнего яруса блока; в материале, полученном в производственных условиях: 312–331 и 360–370 мкм соответственно. В отливке промышленного производства объемная доля пор изменяется от 0,01 до 0,14 %, а объемная доля эвтектики составляет 25–29 %. В отливке заготовки лопатки промышленного производства размеры пор были больше, чем в отливках опытного производства ВИАМ.

Таким образом, структура литых заготовок лопаток из ИНС марки ВИН4М-ВИ опытного производства была дисперснее, чем структура отливок, полученных в условиях промышленного производства. Однако количественные характеристики сплава, полученные как в опытно-промышленных, так и в производственных условиях, характерны для ИНС в литом состоянии.

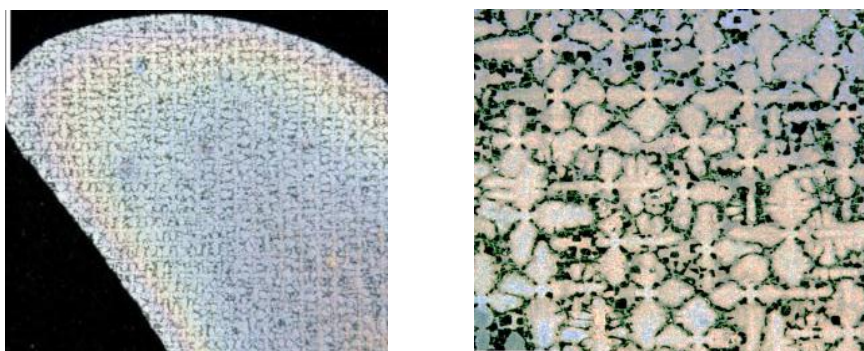


Рис. 5. Дендритная структура сплава ВИН4М-ВИ в пере отливки сопловой лопатки

Исследование микроструктуры сплава ВИН4М-ВИ методом растровой электронной микроскопии

Микроструктуру заготовок сопловых лопаток из сплава ВИН4М-ВИ исследовали на микрошлифах в поперечном сечении (рис. 6).

Микроструктура сплава ВИН4М-ВИ в отливках сопловых лопаток в литом состоянии имеет дендритно-ячеистое строение (рис. 6, *a*). В осях дендритов и в междендритных участках частицы γ' -фазы разделены тонкими прослойками γ -твердого раствора. В междендритных участках наряду с частицами γ' -фазы неправильной формы и разного размера расположены глобулы эвтектической γ' -фазы, выделения неравновесной эвтектики ($\gamma'+\beta$) и другие избыточные фазы разного химического состава, размера и морфологии (рис. 6, *b*, *c*). В образцах присутствуют поры. В осях дендритов частицы γ' -фазы более мелкие, чем в междендритных участках, и имеют огранку, близкую к кубоидной (рис. 6, *d*, *e*). Частицы интерметаллидной γ' -фазы окружены тонкими прослойками γ -твердого раствора.

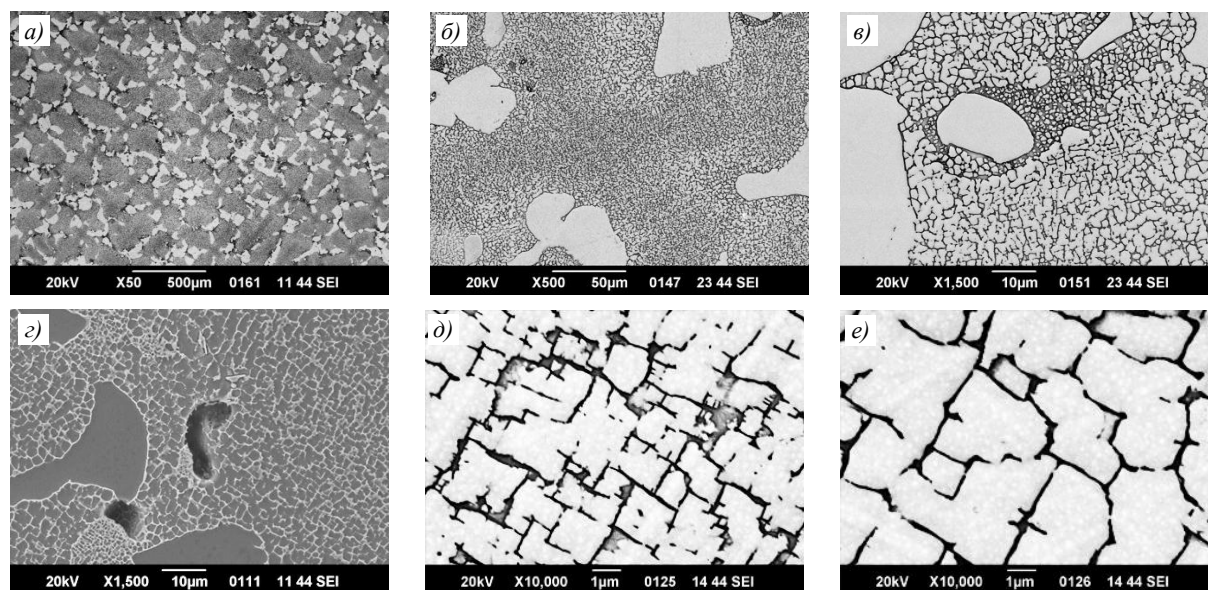


Рис. 6. Характерная микроструктура заготовки сопловой лопатки из сплава ВИН4М-ВИ в литом состоянии: *a* – дендритно-ячеистая структура; *b* – структура осей дендритов; *b*, *c* – эвтектическая (фаза $\gamma'+\beta$) структура в междендритных участках; *d*, *e* – морфология γ' -фазы в осях дендритов и междендритных участках

Методом растровой электронной микроскопии показано, что микроструктура сплава ВИН4М-ВИ в отливках сопловых лопаток характерна для ИНС с КГО [001] в литом состоянии.

Заключения

Получены опытные партии заготовок малоразмерных сопловых лопаток из ИНС марки ВИН4М-ВИ. Выход годных заготовок, имеющих монокристаллическую структуру с отклонением до 10 градусов от заданного направления [001], составил не менее 75 % в условиях опытно-промышленного производства (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) и на уровне 70 % – в производственных условиях машиностроительного предприятия. Первые результаты промышленного опробования технологии литья заготовок сопловых лопаток турбины из нового ИНС марки ВИН4М-ВИ с монокристаллической структурой КГО [001] показали, что разработанную технологию литья можно использовать для получения отливок деталей перспективного вертолетного двигателя многоцелевого назначения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [1].

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность ведущему инженеру Н.А. Лонской и ведущему инженеру А.Н. Раевских за проведение металлографических исследований, заместителю директора по производству А.Б. Логачеву за организацию работ промышленного опробования.

Список литературы

1. 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.
2. Дроздов А.А., Поварова К.Б., Морозов А.Е., Антонова А.В., Булахтина М.А., Аладьев Н.А. Дендритная ликвация в монокристаллах интерметаллидных сплавов на основе Ni₃Al, легированных Cr, Mo, W, Ti, Co, Re // *Металлы*. 2015. № 4. С. 48–55.
3. Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Сплавы на основе алюминидов никеля NiAl, Ni₃Al для двигателестроения // *Авиационная промышленность*. 1999. № 2. С. 47–50.
4. Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Высокотемпературный литейный жаропрочный сплав на основе алюминидов Ni₃Al // *Авиационные материалы и технологии*. 2000. № 3. С. 20–24.
5. Каблов Е.Н., Поварова К.Б., Бунтушкин В.П., Казанская Н.К., Базылева О.А. Высокотемпературные сплавы на основе Ni₃Al для неохлаждаемых сопловых и рабочих лопаток ГТД // *Тез. докл. Межотрасл. науч.-практич. конф. «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли»*. М.: ВИАМ, 2002. С. 33–34.
6. Герасимов В.В., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // *Труды ВИАМ*. 2015. № 3 (36). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
8. Поварова К.Б., Бунтушкин В.П., Казанская Н.К., Дроздов А.А. Сравнительный анализ принципов создания жаропрочных никелевых суперсплавов и сплавов на основе Ni₃Al (γ -фаза) // *Перспективные материалы*. 2005. № 2. С. 9–19.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. М.: Наука, 2006. С. 56–78.
10. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Королев А.В. Монокристаллические жаропрочные сплавы: состав, технологии, структура и свойства // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД»*. М.: ВИАМ, 2017. С. 271–303.
11. Висик Е.М., Тихомирова Е.А., Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Герасимов В.В., Живушкин А.А. Технологическое опробование нового жаропрочного сплава с низкой плотностью при литье турбинных рабочих монокристаллических лопаток // *Металлург*. 2017. № 2. С. 34–40.

12. Герасимов В.В. От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья монокристаллических лопаток ГТД) // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (40). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1.
13. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия. М.: МИСиС, 2006. 632 с.
14. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
15. Ma D., Wang F., Wu Q., Bogner S., Bührig A.S. Innovations in Casting Techniques for Single Crystal Turbine Blades of Superalloys // Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium on Superalloys. Wiley, 2016. P. 237–246. DOI: 10.1002/9781119075646.ch26.
16. 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 2004. TMS Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 421–445.
17. Толорайя В.Н., Демонис И.М., Остроухова Г.А. Формирование монокристаллической структуры литых крупногабаритных турбинных лопаток ГТД и ГТУ на установках высокоградиентной направленной кристаллизации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 1. С. 25–33.
18. Кузьмина Н.А., Петрушин Н.В., Висик Е.М., Еремин Н.Н., Наприенко С.А. Применение метода Лауэ для исследования структуры образца никелевого жаропрочного сплава, разрушенного в процессе механической обработки // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12.
19. Тихомирова Е.А., Сидохин Е.Ф. Определение методом Лауэ кристаллографической ориентировки и разориентировки блоков монокристаллических изделий при производстве турбинных лопаток // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27). С. 43–49.
20. 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: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
21. 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: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Drozdov A.A., Povarova K.B., Morozov A.E., Antonova A.V., Bulakhina M.A., Aladieva N.A. Dendritic liquidation in single-zerolins of intermetallic alloys based on Ni₃Al, alloyed Cr, Mo, W, Ti, Co, Re. *Metally*, 2015, no. 4, pp. 48–55.
3. Buntushkin V.P., Bazileva O.A. Allocations based on nickel aluminides NiAl, Ni₃Al for engineering. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1999, no. 2, pp. 47–50.
4. Buntushkin V.P., Bazileva O.A. High-temperature foundry of the Ni₃Al aluminum-resistant alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2000, no. 3, pp. 20–24.

5. Kablov E.N., Povarova K.B., Buntushkin V.P., Kazan N.K., Bazilyov O.A. High-temperature alloys based on Ni₃Al for neocluded nozzle and working blades of the gas turbine engine. *Report Intersectoral Scientific and practical. Conf. "Problems of creating new materials for the air-cosmic industry"*. Moscow: VIAM, 2002, pp. 33–34.
6. Gerasimov V.V., Petrushin N.V., Visik E.M. Improvement of casting technology and composition of single crystal blades made of heat-resistant intermetallic alloy. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V. New single crystal heat-resistant intermetallic γ' -based alloy for GTE blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
8. Povarova K.B., Buntushkin V.P., Kazan N.K., Drozdov A.A. A comparative analysis of the principles of the creation of heat-resistant nickel super-payments and alloys based on Ni₃Al (γ -phase). *Perspektivnye materialy*, 2005, no. 2, pp. 9–19.
9. Kablov E.N., Petrushin N.V. Computer method for constructing casting heat-resistant nickel alloys. *Foundry heat-resistant alloys. The effect of S.T. Kishkin*. Moscow: Nauka, 2006, pp. 56–78.
10. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Korolev A.V. Monocrystalline heat-resistant alloys: composition, technology, structure and properties. *Materials of All-Rus. Sci.-tech. Conf. "Fundamental and applied research in the field of creating cast-resistant nickel and intermetal alloys and highly effective technologies for the manufacture of GTD parts"*. Moscow: VIAM, 2017, pp. 271–303.
11. Visik E.M., Tikhomirova E.A., Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Gerasimov V.V., Zhihushkin A.A. Technological testing of a new heat-resistant alloy with low density when casting turbine workers of monocrystalline blades. *Metallurg*, 2017, no. 2, pp. 34–40.
12. Gerasimov V.V. From single-crystal uncooled blades to turbines blades with penetration (transpiration) cooling made by additive technologies (review on technology of single-crystal GTE blades casting). *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, paper no. 1. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1.
13. Kablov E.N. Casting shoulder blades of gas turbine engines: alloys, technology, coating. Moscow: MISIS, 2006, 632 p.
14. Kolyadov EV, Visik EM, Gerasimov VV, Arginbaeva E.G. The influence of directional solidification parameters on the structure and properties of the intermetallic alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.
15. Ma D., Wang F., Wu Q., Bogner S., Bührig A.S. Innovations in Casting Techniques for Single Crystal Turbine Blades of Superalloys. *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium on Superalloys*. Wiley, 2016, pp. 237–246. DOI: 10.1002/9781119075646.ch26.
16. 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 2004*. TMS Minerals, Metals & Materials Society, 2004, pp. 421–445.
17. Toloraya V.N., Demonis I.M., Ostroukhova G.A. The formation of a monocrystalline structure of alloy large-sized turbine blades of the GTD and GTU at the installations of high-gradient directed crystallization. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 2011, no. 1, pp. 25–33.
18. Kuzmina N.A., Petrushin N.V., Visik E.M., Eremin N.N., Naprienko S.A. Application of the Laue method to study the structure of a nickel heat-resistant alloy sample destroyed during mechanical processing. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12.
19. Tikhomirova E.A., Sidokhin E.F. Determination by the method of LAUE crystallographic orientation and devastating of the blocks of monocrystal products in the production of turbine shovels. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011, no. 3 (27), pp. 43–49.

20. 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: May 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.
21. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.

Информация об авторах

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

Колядов Евгений Викторович, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кузьмина Наталья Александровна, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Elena M. Visik, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny V. Kolyadov, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya.A Kuzmina, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.07.2023.

The article was submitted 27.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 12.07.2023.