

УДК 669.017.165

Е.В. Колядов<sup>1</sup>, Е.М. Висик<sup>1</sup>, В.В. Герасимов<sup>1</sup>, Э.Г. Аргинбаева<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26

*Представлены сравнительные исследования влияния тепловых условий процесса направленной кристаллизации на установках двух типов: с жидкометаллическим охлаждением (установка УВНК-9А) – процесс LMC (Liquid Metal Cooling) и с радиационным охлаждением (установка фирмы ALD) – процесс HRS (High Rate of Solidification), на параметры литой структуры сплава ВКНА-4УМОНО. Проведены сравнительный количественный анализ микроструктуры, характеристик прочности при кратковременных испытаниях на растяжение отливок из сплава ВКНА-4УМОНО с кристаллографической ориентацией КГО [111], полученных на установках двух типов, и анализ изломов образцов сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой после кратковременных испытаний на растяжение. Показано влияние градиента температуры на фронте роста на структуру и механические свойства сплава ВКНА-4У с КГО [111] и нового сплава для монокристаллического литья ВИН4 с КГО [001]. Представлены основные характеристики плавильно-заливочных установок для литья интерметаллидных сплавов методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охлаждением.*

**Ключевые слова:** интерметаллидные сплавы, направленная кристаллизация, установки для монокристаллического литья, температурный градиент.

E. V. Kolyadov<sup>1</sup>, E. M. Visik<sup>1</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1</sup>, E. G. Arginbaeva<sup>1</sup>

## THE INFLUENCE OF DIRECTIONAL SOLIDIFICATION PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE INTERMETALLIC ALLOYS

*Comparative studies of the influence of thermal conditions of the process of directional crystallization in plants of two types are presented: liquid metal cooling (UVKH-9A installation) – LMC process (Liquid Metal Cooling) and radiation cooling (ALD installation) – HRS process (High Rate of Solidification) on the parameters of the cast structure of the VKNA-4UMONO alloy. A comparative quantitative analysis of the microstructure, strength characteristics during short-term tensile tests of castings from VKNA-4UMONO alloy with crystallographic orientation of CGO [111], obtained on installations of two types, and analysis of fractures of VKNA-4U samples of single-crystal structure after short-term tests on stretching. The effect of temperature gradient at the growth front on the structure and mechanical properties of VKNA-4U alloy with KGO [111] and a new alloy for single-crystal casting VIN4 with CGO [001] is shown. The main characteristics of melting and casting plants for casting intermetallic alloys by the method of directional solidification with liquid metal cooling are presented.*

**Keywords:** intermetallic alloys, directional solidification, single crystal casting equipment, temperature gradient.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Для создания перспективных образцов авиационной техники в Российской Федерации определены задачи увеличения тяги – на 20%, экономичности снижения массы – до 30%, удельного расхода топлива. Решение поставленных задач непосредственно связано с использованием новых конструкционных материалов с улучшенными служебными характеристиками и высокоэффективных технологий их переработки, а реализация основана на отечественных разработках [1].

Многокомпонентные литейные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  типа ВКНА (ВКНА-1В, ВКНА-4У, ВКНА-25) с ГЦК-структурой ( $\gamma'+\gamma$ ), где  $\gamma'$  – фаза на основе  $Ni_3Al$ . При этом объемная доля  $\gamma'$ -фазы достигает 85%, что обеспечивает сопротивление высокотемпературному окислению.

Сплавы типа ВКНА, легированные Al в количестве 8–9% (по массе), отличаются пониженной плотностью (по сравнению с никелевыми сплавами типа ЖС), стабильностью структурно-фазовых характеристик, что обеспечивает сопротивление ползучести и работоспособность при температурах до 1200°C (длительно) и до 1250°C (кратковременно) в агрессивных окислительных средах. Кроме того, сплавы этого типа не имеют в своем составе остродефицитных элементов и характеризуются низкой стоимостью. Экономнолегированные сплавы серии ВКНА применяются без термической обработки в отличие от жаропрочных никелевых дисперсноупрочненных сплавов. Для этих сплавов используют лишь кратковременный отжиг для снятия поверхностных литейных напряжений и напряжений после механической обработки [2–7].

Ранее изучены особенности дендритной ликвации в монокристаллах типа ВКНА, определены коэффициенты ликвации легирующих элементов сплавов, изучено влияние скорости охлаждения на коэффициенты ликвации легирующих элементов, а также некоторые отличия в характере жаропрочных и интерметаллидных сплавов [2–4, 8–13].

Сплавы семейства ВКНА с монокристаллической структурой с аксиальной кристаллографической ориентацией (КГО) [111] обладают оптимальным уровнем свойств. Как было установлено исследованиями, при получении монокристаллической структуры с (КГО) [111] реализуется повышенное сопротивление температурной усталости и высокая жаропрочность. Для литья неохлаждаемых лопаток из интерметаллидных сплавов типа ВКНА выбрано именно это кристаллографическое направление. Интерметаллидные жаропрочные сплавы семейства ВКНА используются для отливки деталей с монокристаллической структурой с КГО  $\langle 111 \rangle$ .

Однако из-за повышенного модуля упругости монокристаллов с такой ориентацией применение указанных интерметаллидных сплавов для литья охлаждаемых монокристаллических лопаток ограничено из-за опасности возникновения повышенных термических напряжений, величина которых пропорциональна модулю упругости [2–4, 7]. Поэтому во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд жаропрочных монокристаллических интерметаллидных сплавов, предназначенных для изготовления монокристаллических турбинных лопаток и других деталей с КГО  $\langle 001 \rangle$  (сплав ВИН3 – с плотностью 8,25 г/см<sup>3</sup>, сплав ВИН4 – с плотностью 8,13 г/см<sup>3</sup>) [3]. Проведены опытно-технологические работы по освоению нового жаропрочного интерметаллидного сплава ВИН3, обеспечивающего (по сравнению с применяемым сплавом ЖС6У) увеличение ресурса лопаток в 4 раза и повышение рабочей температуры сопловых лопаток турбины на 150°C.

Успешной разработке технологии литья этих сплавов способствует то, что отливки из интерметаллидных сплавов типа ВКНА получают на том же оборудовании, что и жаропрочные никелевые сплавы, однако при освоении их в производстве требуются дополнительные исследования технологических режимов литья с целью повышения выхода годного по макроструктуре сплава.

В отечественном промышленном производстве для литья методом направленной кристаллизации (НК) заготовок (лопаток, створок и др.) из жаропрочных сплавов используются установки типа УВНК, разработанные во ФГУП «ВИАМ», – вакуумные плавильно-заливочные установки с жидкометаллическим охлаждением кристаллизующей отливки с различными значениями температурного градиента  $G$  и различным размером рабочего пространства печи подогрева формы (ППФ) [13–18]:

– вакуумные плавильные установки типа УВНК-9А промышленного назначения, которыми оснащены все авиадвигателестроительные предприятия, – для получения литых рабочих и сопловых лопаток из жаропрочных сплавов длиной до 300 мм с температурным градиентом  $G=60–80^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (рис. 1, а);

– установки типа УВНК-15 (УВНК-14) – для литья рабочих и сопловых лопаток из жаропрочных сплавов длиной до 600 мм с температурным градиентом  $G=50–60^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (рис. 1, б);

– установки типа УВНК-10 – для получения методом НК крупногабаритных лопаток, створок и проставок реактивного сопла, дисковых заготовок длиной до 800 мм с температурным градиентом  $G=50–60^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (рис. 1, в).



Рис. 1. Вакуумные плавильные установки УВНК-9А (а), УВНК-15 (б) и УВНК-10 (в)

Установки типа УВНК имеют автоматизированную систему управления процессом, что позволяет повысить надежность их работы и производительность процесса за счет сокращения времени на технологическую подготовку, а также обеспечить воспроизводство процесса и повысить выход годного при литье сплава.

На промышленных установках типа УВНК-9А с жидкометаллическим охладителем (Al) процесс НК отливок лопаток ГТД осуществляется перемещением керамической формы с расплавом жаропрочного сплава из зоны нагрева в зону охлаждения: жидкометаллический охладитель – расплав алюминия (метод литья LMC – Liquid Metal Cooling), который обеспечивает более высокие скорости охлаждения кристаллизующей отливки (в 39 раз превышающие скорость охлаждения при радиационном охлаждении по методу Бриджмена (метод литья HRS – High Rate Solidification), получившему применение за рубежом) [14–20].

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») [1].

### Материалы и методы

Для оценки влияния тепловых параметров процесса направленной кристаллизации на параметры литой структуры интерметаллидного сплава ВКНА-4У исследовали заготовки образцов  $\varnothing 16$  мм, полученные двумя методами направленной кристаллизации:

– с жидкометаллическим охлаждением (установка УВНК-9А) – метод LMC (Liquid Metal Cooling);

– с радиационным охлаждением (установка фирмы ALD) – метод HRS (High Rate Solidification).

Сравнительное исследование структурно-фазового состояния сплава образцов из интерметаллидных жаропрочных сплавов проводили методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе JSM-840.

Фрактографический анализ образцов из сплава ВКНА-4У (монокристалл) после кратковременных испытаний на однократное растяжение проводили на микроскопе JSM-840.

Определение междендритного расстояния, объемной доли литейных пор и неравновесной эвтектики  $\gamma+\gamma'$  в образцах, изготовленных из отливок, полученных по разным методам литья, проводили методом оптической количественной металлографии на протравленных шлифах с помощью стереомикроскопа фирмы Leica.

## Результаты и обсуждение

### *Исследование сплава ВКНА-4У с КГО <111>*

Основными характеристиками процесса НК расплава являются скорость кристаллизации ( $R$ ) и осевой термический градиент на линии ликвидус ( $G_L$ ). Известно, что принципиальное отличие получения отливок на этих установках заключается в том, что на установке УВНК-9А литейный сплав, залитый в оболочковую форму, подвешенную на специальной подвеске, кристаллизуется при перемещении формы из ППФ в кристаллизатор – расплав алюминия, а на установке ALD форма, установленная на медном водоохлаждаемом столике, в процессе кристаллизации опускается, вытягивая форму из ППФ. В результате в установке УВНК-9А (LMC) за счет конвективного отбора теплоты от кристаллизующегося сплава температурный градиент на линии изоликвидус составляет  $G=60-80^\circ\text{C}/\text{см}$ , а в установке ALD (HRS) –  $G=20-40^\circ\text{C}/\text{см}$  (рис. 2). На обеих установках для НК осуществлено литье заготовок образцов из сплава ВКНА-4У с КГО <111> при одинаковых параметрах НК (температуры нагревателей и расплава, скорость погружения формы, продолжительность выдержки).

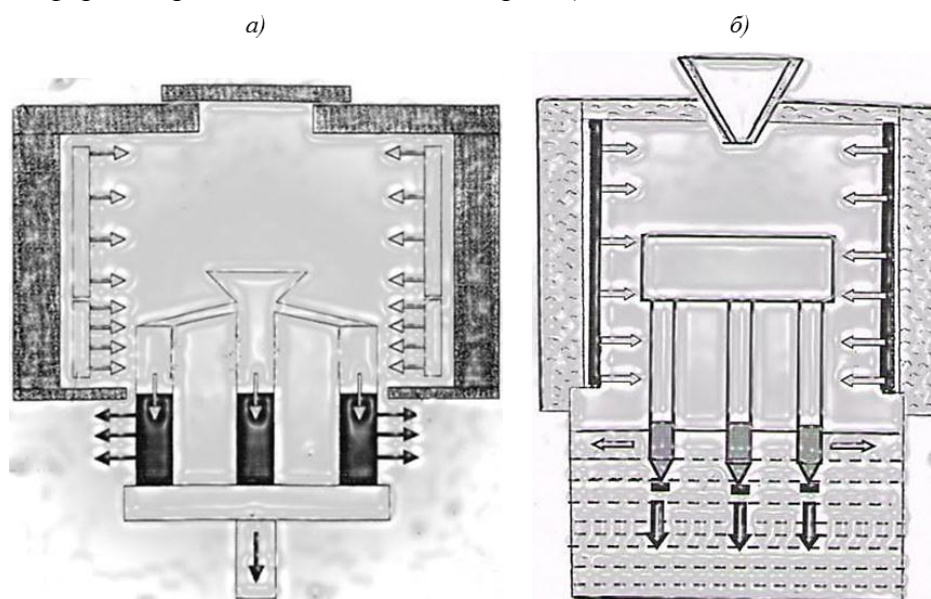


Рис. 2. Схемы направленной кристаллизации по методу HRS с радиационным охлаждением (а) и по методу LMC с жидкометаллическим охлаждением (б)

На полученных отливках после травления для выявления структуры проведены сравнительные исследования микроструктуры сплава ВКНА-4У с помощью оптической и растровой электронной микроскопии.

На поперечных шлифах цилиндрических заготовок, полученных с обеих установок, видно, что структура сплава содержит ориентированные дендриты в направлении  $\langle 111 \rangle$  (рис. 3). Микроструктура литых образцов из сплава ВКНА-4У с КГО  $\langle 111 \rangle$ , полученных по двум схемам НК, является характерной для монокристаллической структуры и представляет собой дендритно-ячеистую структуру: в междендритных участках наряду с более крупными частицами  $\gamma'$ -фазы неправильной формы и разного размера расположены глобулы эвтектической ( $\gamma'+\beta$ )-фазы вследствие микроликвации легирующих элементов в процессе НК исследуемого сплава. Частицы интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы окружены тонкими прослойками  $\gamma$ -твердого раствора, они более мелкие в сплаве ВКНА-4У с КГО  $\langle 111 \rangle$ , полученном на установке УВНК-9А. Проведенные исследования не выявили качественных различий в структуре сплава.

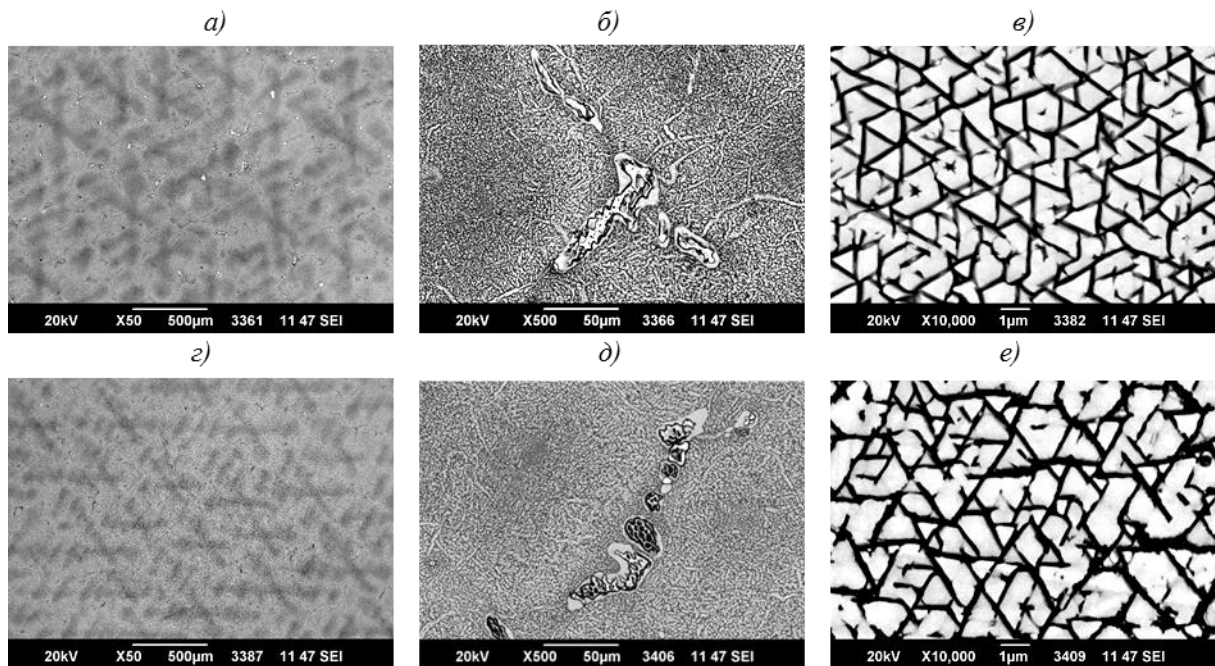


Рис. 3. Микроструктура литого образца из сплава ВКНА-4У с КГО  $\langle 111 \rangle$ , полученного на установках УВНК (а-е) и ALD (z-е):

а, z – дендритная структура; б, д – эвтектическая ( $\gamma'+\beta$ )-фаза; в, е – морфология  $\gamma'$ -фазы в осях дендритов

Количественный микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) образцов из сплава ВКНА-4У, полученных на обеих установках, также не выявил существенной разницы в их элементном составе и ликвационных характеристиках. Проведенный количественный анализ с помощью стереомикроскопа фирмы Leica междендритного расстояния между осями I ( $\lambda_I$ ) и II порядка ( $\lambda_{II}$ ) на травленных шлифах показал, что структура литых заготовок из сплава ВКНА-4У, полученных на установке УВНК-9А, более дисперсна, чем для заготовок, полученных на установке ALD. Причем эта разница более выражена в верхнем сечении, что связано со значительным уменьшением температурного градиента  $G_z$  из-за снижения эффективности теплоотвода тепла при нарастании закристаллизовавшейся части отливки на установке ALD (рис. 4). В результате снижения значений  $G_z$  увеличивается высота твердожидкой зоны расплава и повышается объемная доля микропор.

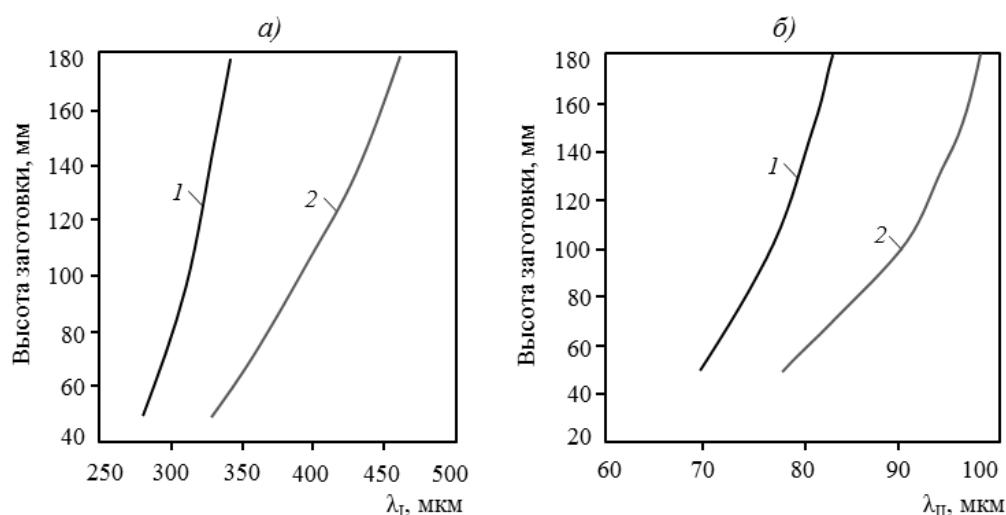


Рис. 4. Изменение междендритного расстояния между осями I ( $a - \lambda_I$ ) и II порядка ( $b - \lambda_{II}$ ) по высоте цилиндрических заготовок из сплава ВКНА-4У, полученных на установках УВНК-9А (1) и ALD (2)

Исследование микропористости выявило значительное превышение объемной доли микропор в образцах, полученных на установке ALD, в верхней части – до 0,63%, в то время как в образцах, полученных в печи УВНК-9А, – 0,22%, т. е. разница составила 2,5 раза (табл. 1).

Таблица 1

**Объемная доля пор в образцах из сплава ВКНА-4У  
(количество обработанных наихудших полей  $N=50$  шт.)**

Установка для получения образцов	Объемная доля пор, % (разброс на $N$ полях при $\times 200$ )	Среднее количество пор (разброс) на поле зрения, шт./мм <sup>2</sup>	Максимальная площадь поры $D_{Si\max}$ , мкм <sup>2</sup>	Максимальный размер пор $D_{i\max}$ , мкм	
				в длину	в ширину
УВНК	0,22 (0,09–0,65)	22 (7–46)	1635,60	93,03	66,54
ALD	0,63 (0,19–1,78)	32 (13–62)	2569,53	144,21	81,29

Для оценки влияния дисперсности дендритной структуры на механические свойства сплава ВКНА-4У провели исследования кратковременной прочности в интервале температур 20–1000°C при растяжении образцов в термически обработанном состоянии. Образцы изготовлены из нижней и верхней частей литых цилиндрических заготовок.

Анализ результатов испытаний образцов из интерметаллидного сплава ВКНА-4У на кратковременную прочность при растяжении показывает, что с повышением температуры испытания значения прочности снижаются в соответствии с данными паспорта на материал (рис. 5). Однако сравнительные испытания при температурах 20 и 900°C на образцах, полученных на обеих установках, показали, что образцы, вырезанные из верхней части литых заготовок, полученных на установке фирмы ALD, имеют значение предела прочности  $\sigma_b$  ниже средних паспортных значений. Это может являться следствием укрупнения дендритной структуры отливок сплава и их повышенной микропористости.

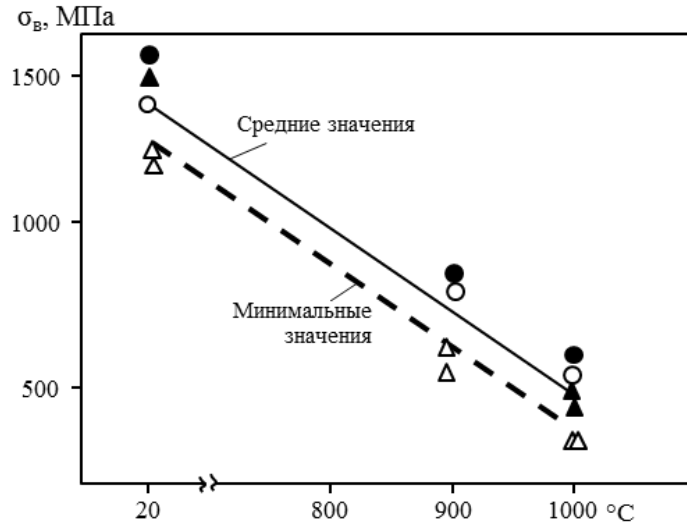


Рис. 5. Результаты кратковременных испытаний монокристаллических образцов из интерметаллического сплава ВКНА-4У (КГО [111]):

● – низ заготовки, ○ – верх заготовки (установка УВНК-9А); ▲ – низ заготовки, △ – верх заготовки (установка ALD)

Фрактографический анализ изломов испытанных и разрушенных образцов из сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой показал, что в начальных зонах разрушения всех образцов наблюдались литейные дефекты типа усадочной рыхлоты (рис. 6). Очаги разрушения связаны с местом расположения рыхлоты. Однако отмечено, что наиболее значительная рыхлота наблюдается в образцах, полученных на установке ALD, где отмечено большое скопление дефектов в центральной области образца, что в итоге способствует разрушению и понижению кратковременных свойств сплава до минимальных значений. На образцах, полученных на установке фирмы ALD, начальная зона разрушения расположена в центре излома; в зоне развития обнаружены участки усадочной рыхлоты (рис. 7). Участки усадочной рыхлоты наблюдались по всему сколу на фоне малопластичного мелкоячеистого строения, характерного для однократного разрушения.

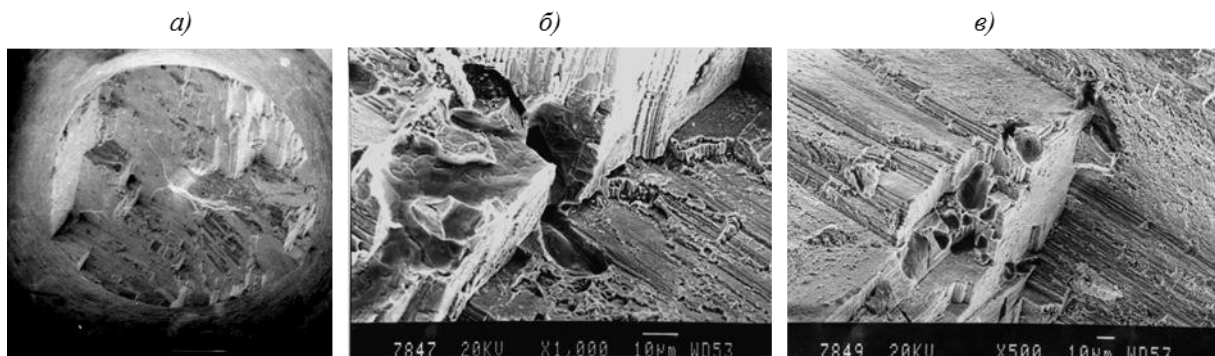


Рис. 6. Строение излома образца после испытаний при температуре 20°C, полученного на установке УВНК-9А:

а – общий вид, ×14; б – в очаге; в – в зоне развития

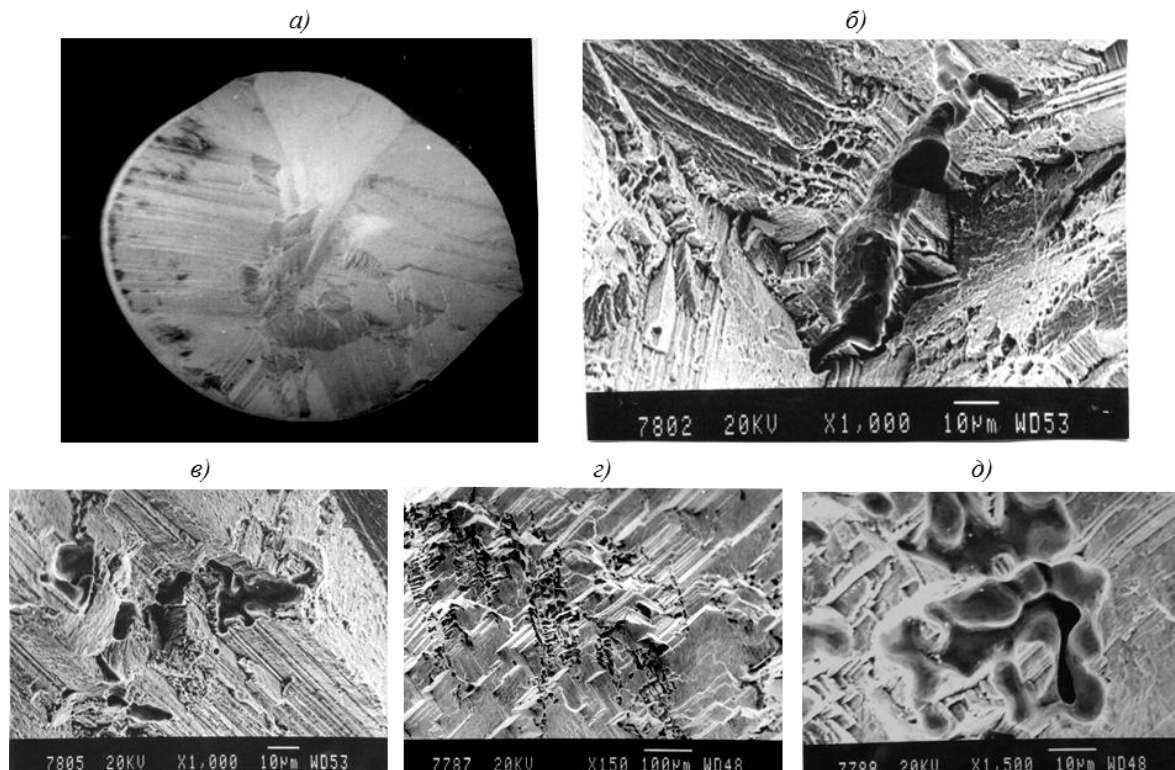


Рис. 7. Строение излома образца после испытаний при температуре 20°C, полученного на установке ALD:

*a* – общий вид,  $\times 14$ ; *б* – вблизи очага; *в* – в зоне развития; *г*, *д* – участки с усадочной рыхлостью в начальной зоне разрушения

Количественный микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) элементного состава сплава ВКНА-4У и ликвационных характеристик материала образцов на аппарате «Суперпроб-733» и микроанализаторе Inca Energy, после литья и термической обработки не выявил существенных различий в ликвационных характеристиках основных легирующих элементов сплава (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты ликвации ( $K_L$ ) в литом и термообработанном состоянии сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой**

Установка для получения образцов	Состояние сплава	$K_L = C_d / C_{м.д.}$ * для элемента				
		Al	Cr	Co	Mo	W
ALD	Литой	0,9	0,9	1,2	0,7	2,4
	Термообработанный	0,9	1,0	1,2	0,8	1,9
УВНК	Литой	0,9	0,9	1,2	0,7	2,1
	Термообработанный	1,0	0,9	1,0	0,8	1,9

\*  $C_d, C_{м.д.}$  – концентрация элемента в дендрите и междендритных участках.

**Исследование сплава ВИН4 с КГО <001>**

Исследовано влияние температурного градиента  $G$  на микроструктурные характеристики сплава ВИН4 с КГО <001>. На установках УВНК-9А (охлаждение в Al) с  $G=60-80^\circ\text{C}/\text{см}$  и УВНС-6 (охлаждение в Sn) с  $G=150^\circ\text{C}/\text{см}$  отлиты образцы из сплава ВИН4 [18, 19]. Микроструктура сплава, полученного методом НК с этими температурными градиентами, представляет собой  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фазы, кроме того, в межосном пространстве расположены  $\gamma'$ -фаза и легированная  $\beta$ -фаза ( $\text{NiAl}_{\text{лег}}$ ) (рис. 8).

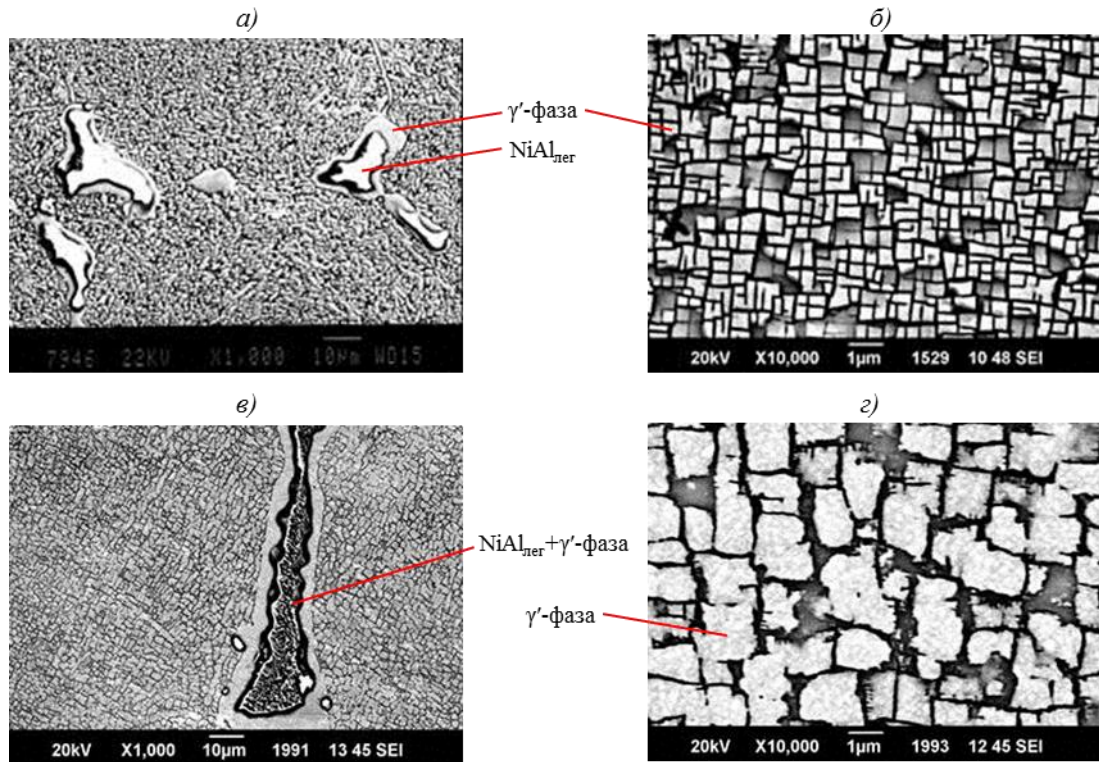


Рис. 8. Микроструктура монокристаллов сплава ВИН4, отлитого с температурными градиентами кристаллизации  $G=150^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (а, б) и  $G=60\text{--}80^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (в, г)

Структура отливок отлична в осях дендритов: присущие КГО [001] кубоиды  $\gamma'$ -фазы меньше по размеру, границы четче в случае литья с  $G=150^{\circ}\text{C}/\text{см}$ .

Результаты испытаний на статическое растяжение образцов из сплава ВИН4, изготовленных с разными значениями температурного градиента, показаны на рис. 9 и 10. Монокристаллы, отлитые при температурном градиенте  $G=150^{\circ}\text{C}/\text{см}$ , имеют значения кратковременной прочности ( $\sigma_{\text{в}}$ ) при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и длительной прочности ( $\sigma_{\text{т}}$ ) при температурах  $900$  и  $1100^{\circ}\text{C}$  несколько выше, чем на образцах, полученных с  $G=60\text{--}80^{\circ}\text{C}/\text{см}$ , очевидно, благодаря более дисперсной структуре осей дендритов. Но значения  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{\text{т}}$  при температуре  $1200^{\circ}\text{C}$  почти одного порядка.

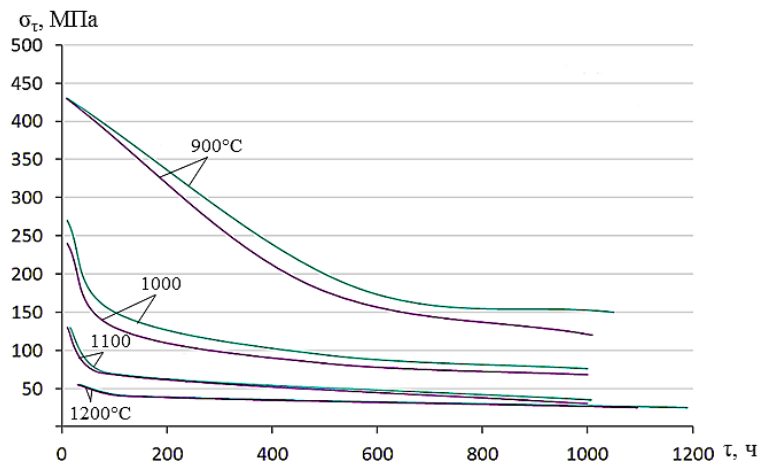


Рис. 9. Сравнительные результаты испытаний на длительную прочность интерметаллидного сплава ВИН4 с КГО [001] при температурах  $900$ ,  $1000$ ,  $1100$ ,  $1200^{\circ}\text{C}$  и температурных градиентах  $G=150^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (—) и  $G=60^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (—)

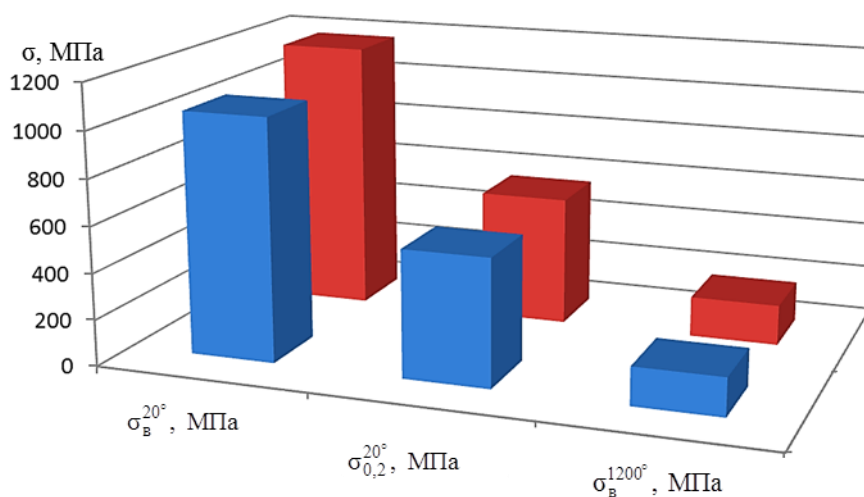


Рис. 10. Средние значения механических свойств интерметаллидного монокристаллического сплава после направленной кристаллизации с температурными градиентами кристаллизации  $G=60-80^\circ\text{C/cm}$  (■) и  $G=150^\circ\text{C/cm}$  (■)

Анализ результатов проведенных исследований позволяет утверждать, что для повышения качества макроструктуры отливок из интерметаллидных сплавов и их механических свойств необходимо повышение скорости охлаждения, т. е. параметра  $GR$ . Повышение значений  $G$  возможно при изменении температуры горячей и холодной зон и хорошем экранировании этих зон друг от друга. Однако повышение температуры горячей зоны ограничено работоспособностью керамической формы. Повышение скорости кристаллизации ограничено теплоотводом от кристаллизующейся отливки и ее размером. Поэтому роль тепловых экранов в процессе направленной кристаллизации трудно переоценить. Применение экранов позволяет обеспечить однонаправленный тепловой поток с максимальным осевым градиентом без боковых потерь тепла в окружающее пространство печи. Однако применение тепловых экранов сопряжено с рядом трудностей конструктивного характера. Так, при изменении геометрической формы, наличии полков, замков и других изменений поперечного сечения деталей трудно обеспечить плотное прилегание экранов к боковым поверхностям формы отливки, что приводит к изменениям соотношения продольного и поперечного градиентов температуры и изменениям в морфологии структурных составляющих сплавов, в частности морфологии осей дендритов первого порядка.

Во ФГУП «ВИАМ» для установок типа УВНК разработана конструкция теплоизоляционных экранов с автоматизированной системой управления, позволяющая отслеживать изменение геометрической формы отливки при направленной кристаллизации. Тепловые экраны позволяют значительно снизить градиент  $G_z$  и повысить градиент  $G_x$  при кристаллизации отливки сложной геометрической формы, что, в свою очередь, уменьшает кривизну фронта кристаллизации и снижает количество структурных дефектов («паразитные» зерна, блочность структуры, полосчатость и т. д.), а также позволяют управлять размером структурных составляющих сплава в образцах и отливках деталей, получаемых из жаропрочных сплавов. Дальнейшие исследования влияния условий процесса направленной кристаллизации с переменным управляемым температурным градиентом на фронте роста на особенности структуры жаропрочных и интерметаллидных сплавов открывают перспективы в улучшении качества, однородности структуры в монокристаллических деталях, в существенном повышении уровня их свойств [17–19].

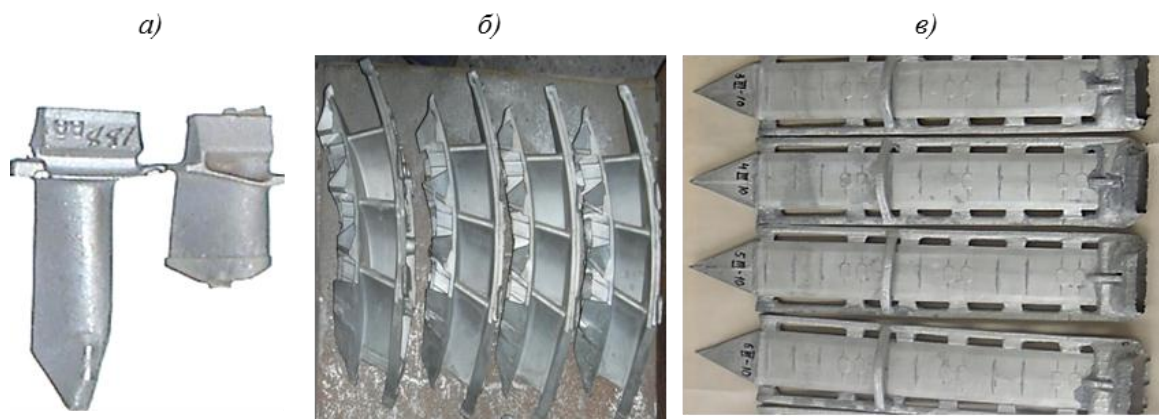


Рис. 11. Отливки деталей из интерметаллидных сплавов, полученные с монокристаллической структурой на установках типа УВНК

Для сплавов типа ВКНА получены следующие практические результаты:

- малогабаритные неохлаждаемые лопатки из сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой с КГО [111], отлитые на установке УВНК-9А в производственных условиях ФГУП «ВИАМ», успешно прошли испытания на двигателе ВСУ-10 ОМКБ (рис. 11, а);

- в условиях ФГУП «ВИАМ» отработаны технологические режимы литья на установке УВНК-14 секторов лопаток из трех штук из сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой КГО [111]. Получена опытная партия сопловых охлаждаемых лопаток I ступени, которые прошли длительные испытания в составе изделия турбины двигателя РД-33МК (рис. 11, б);

- отработаны технологические режимы литья протяженных (700 мм) заготовок детали «Проставка» реактивного сопла с управляемым вектором тяги из интерметаллидного сплава ВКНА-1В с КГО [111] на установке для литья УВНК-10 методом НК, осуществлена поставка опытной партии деталей на УМПО, где проводились испытания на испытательном стенде (рис. 11, в).

### Заключения

Методами фрактографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального анализов проведены исследования образцов из сплава ВКНА-4У <111>, полученные методом LMC (УВНК-9А) и методом HRS (ALD) в состоянии после литья, термообработки и после испытаний на кратковременную прочность. Установлено, что структура литых заготовок из сплава ВКНА-4У, полученных на установке УВНК-9А, имеют большую дисперсность и меньшее значение доли микропористости, чем у заготовок, полученных на установке ALD. Повышенное значение объемной доли микропор в образцах, полученных на установке ALD, по сравнению с образцами, полученными на установке УВНК-9А, привело к снижению предела прочности ниже средних паспортных значений при испытаниях при температурах 20 и 900°С.

Разработанная технология монокристаллического литья сплавов ВКНА-4У с КГО [111] и ВИН4 с КГО [001] на установках типа УВНК обеспечивает высокие эксплуатационные свойства этих сплавов, удовлетворяющие требованиям к деталям современных ГТД.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность заместителю начальника лаборатории по науке, к.т.н. О.А. Базылевой за помощь в подготовке материалов статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

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. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Герасимов В.В., Тимофеева О.Б. Жаропрочные сплавы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  // *Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение»*. М.: ВИАМ, 2006. С. 71–75.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе  $\gamma'$ -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
4. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Качанов Е.Б., Шалин Р.Е. Высокотемпературные конструкционные сплавы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков*. М.: ВИАМ, 1994. С. 278–284.
5. Harada H. Development of Superalloys for 1700°C ultra-efficient gas turbines // *Proceedings of 9<sup>th</sup> Liege Conference «Materials for Advanced Power Engineering 2010»*. Belgium: University of Liège. 2010. P. 604–614.
6. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 3–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19.
7. Шарова Н.А., Тихомирова Е.А., Барабаш А.Л., Живушкин А.А., Брауэр В.Э. К вопросу о выборе новых жаропрочных никелевых сплавов для перспективных авиационных ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2009. №3 (19). С. 249–255.
8. Дроздов А.А., Поварова К.Б., Морозов А.Е. и др. Дендритная ликвация в монокристаллах интерметаллидных сплавов на основе  $Ni_3Al$ , легированных Cr, Mo, W, Ti, Co, Re // *Металлы*. 2015. №4. С. 48–55.
9. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Королев А.В. Монокристаллические жаропрочные сплавы: состав, технологии, структура и свойства // *Материалы Всеросс. науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» [Электронный ресурс]*. М.: ВИАМ, 2017. С. 271–303.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 38–52.
11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Морозова Г.И., Светлов И.Л. Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащих рений // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. М.: Наука, 2006. С. 116–130.
12. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
13. Скибин В.А., Солонин В.И. Авиационное двигателестроение. Дорога в завтрашний день // *Двигатель*. 2007. №5 (53). С. 1–4.
14. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2006. 632 с.
15. Герасимов В.В., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.

16. Колядов Е.В., Герасимов В.В. Влияние приведенного размера отливки на осевой градиент температуры и макроструктуру отливок при направленной кристаллизации на установке УВНК-15 // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-3-9.
17. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М. Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2018).
18. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 105–117.
19. Miller J.D., Pollock T.M. Development and Application of Optimization Protocol For Directional Solidification: Integration Fundamental Theory, Experimentation and Modeling Tools // *Superalloys 2012*. TMS: Minerals, Metals & Materials Society, 2012. P. 653–662.
20. Esser W. Direction Solidification of Blades for Industrial Gas Turbines // *Materials for Advanced Power Engineering*. 1994. P. 641–659.