
Научная статья

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛОПАТОК ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С НАПРАВЛЕННОЙ И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Ю.А. Бондаренко¹, А.Б. Ечин¹, В.А. Сулова¹, А.Р. Нарский¹

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

Аннотация. Приведено описание развития технологии получения деталей горячего тракта ГТД методом направленной кристаллизации из жаропрочных сплавов. Рассмотрены образцы существующего специализированного оборудования, используемого в России, США, Германии и других странах для получения лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Обоснованно продемонстрирована перспективность метода направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем при производстве лопаток ГТД как для современных, так и для перспективных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: направленная кристаллизация жаропрочного сплава, газотурбинные двигатели, конструкция установок, температурный градиент, дендритная структура, жидкометаллический охладитель

Для цитирования: 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). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.

Scientific article

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR PRODUCING BLADES OF THE HOT PATH OF GAS TURBINE ENGINES FROM SUPERALLOYS WITH DIRECTIONAL AND SINGLE-CRYSTAL STRUCTURE

Yu.A. Bondarenko¹, A.B. Echin¹, V.A. Surova¹, A.R. Narsky¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. A description of the development of the technology for obtaining parts of the hot path of gas turbine engines by the method of directed crystallization from superalloys are considered. The analysis of the existing specialized equipment used in Russia, the USA, Germany and other countries to produce blades with a directional and monocrystalline structure is carried out. The prospects of the method of directed crystallization with a liquid-metal cooler in the production of gas turbine engine blades for both modern and promising gas turbine engines are clearly demonstrated.

Keywords: directed crystallization of superalloy, gas turbine engines, plant design, temperature gradient, dendritic structure, liquid metal cooler

For citation: 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), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.

Введение

Непрерывный процесс развития авиации стимулировал создание газотурбинных двигателей (ГТД) для применения в различных летательных аппаратах, что, в свою очередь, потребовало разработки новых высокопрочных, стойких к воздействию высоких температур конструкционных сплавов и способов их получения. Большинство деталей ГТД имели сложную конструкцию, при их изготовлении широкое применение получил метод точного литья в керамические формы с использованием выплавляемых моделей [1, 2].

Создание ГТД – это очень наукоемкий и дорогостоящий процесс, его могут позволить себе только промышленно развитые страны с существенным научным потенциалом, такие как США, Россия, Франция и Англия, занимающиеся этим с середины прошлого века. Китай, Япония, Южная Корея ведут работы по вступлению в этот клуб. В Германии, Швейцарии и Канаде в основном работают с энергетическими турбинными установками (ГТУ), преимущественно по лицензиям США, частично занимаются ремонтом энергетических ГТУ.

На протяжении десятилетий повышение служебных характеристик ГТД сопровождалось ростом температуры газа перед турбиной (T_T) и давления в компрессоре (P_K) с $T_T = 1200\text{--}1300\text{ К}$, $P_K = 5\text{--}10\text{ атм}$ до $T_T = 2100\text{--}2200\text{ К}$, $P_K = 30\text{--}60\text{ атм}$ в настоящее время.

При этом совершенствовалась конструкция двигателей, включая турбину, и таких основных элементов горячего тракта, как сопловые и рабочие лопатки, камера сгорания. Непрерывно возрастали также характеристики применяемых жаропрочных материалов и защитных покрытий, усложнялась технология их получения. Как правило, повышение служебных характеристик жаропрочных сплавов осуществлялось путем совершенствования их состава, многокомпонентного легирования и технологии их выплавки. В технологии получения наиболее нагруженных деталей ГТД – рабочих и сопловых лопаток – начиная с 1970-х гг. наряду с технологией равноосного литья [1] стали применять направленную кристаллизацию по методу Бриджмена–Стокбаргера [3]. Для реализации более высоких жаропрочных свойств при выплавке сплавов наряду с тугоплавкими элементами (Mo, Nb, Ta, W) стали использовать дорогостоящие (Re, Ru) и редкоземельные элементы (La, Y) [4].

В России промышленное производство конструктивных элементов с направленной структурой было реализовано в начале 1970-х гг. Для этого было создано оригинальное промышленное оборудование – установки типа проходной методической печи ПМП-2 [5, 6]. Общая компоновка установки показана на рис. 1. Получение направленной структуры в ней осуществлялось за счет горизонтального движения опоки с керамической формой в вертикальном убывающем тепловом поле. Шихтовая заготовка помещалась в литейную чашу формы и плавилась и направленно кристаллизовалась при горизонтальном движении формы. Далее контейнеры после остывания выгружались из печи через шлюзовую камеру. Таким образом осуществляли процесс формирования направленной структуры лопаток ГТД.

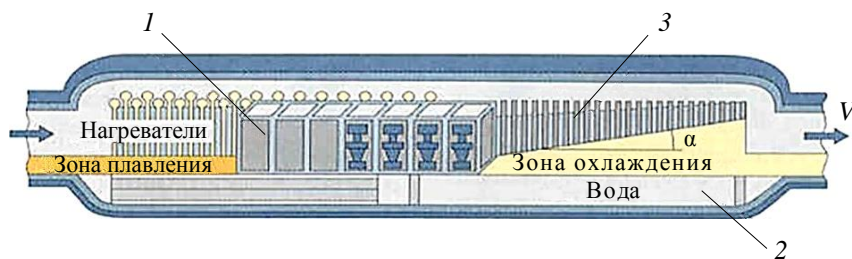


Рис. 1. Конструкция промышленной установки ПМП-2: 1 – контейнеры с формами; 2 – охлаждаемый кристаллизатор; 3 – нагреватель печи подогрева форм

Созданная в СССР установка обладает высокой производительностью, но контролируемый рост кристаллов осуществляется при малом температурном градиенте на фронте роста. Хотя в деталях хорошо растет направленная и монокристаллическая структура, в жаропрочных сплавах, созданных в ВИАМ, дендритная микроструктура формируется в виде крупных ветвей дендритов с расстоянием между осями дендритов $\lambda = 400\text{--}500$ мкм, значительной междендритной пористостью – до $V_p \approx 1,0\%$, существенной междендритной ликвацией и крупными размерами частиц упрочняющей γ' -фазы (до 1,0 мкм). Подобная микроструктура требовала проведения дополнительной термообработки в виде высокотемпературной гомогенизации и отжига для выравнивания размера частиц упрочняющей γ' -фазы и уменьшения дендритной ликвации. Дополнительно на полученных лопатках ГТД было желательно осуществлять газостатическое прессование для уменьшения междендритной пористости. На поверхности лопаток из жаропрочных сплавов со значительным содержанием элементов, идущих на образование дисперсной γ' -фазы и карбидов, могут образовываться ростовые дефекты в виде вертикальных полос (цепочек – *freckles*) выделений эвтектических фаз ($\gamma + \gamma'$ -эвтектики и карбидов). Лопатки с подобными дефектами не допускаются к использованию и бракуются.

В США, Англии и Франции для производства рабочих и сопловых лопаток из сплавов на основе никеля с повышенной прочностью в промышленности широко применяется метод Бриджмена–Стокбаргера [3], где направленная кристаллизация происходит на охлаждаемом водой кристаллизаторе, теплоотвод осуществляется за счет отвода тепла кристаллизатором и излучением с поверхности формы. Принципиальная схема подобных установок представлена на рис. 2, а. На рис. 2, б показано, как оболочковая форма размещена на кристаллизаторе.

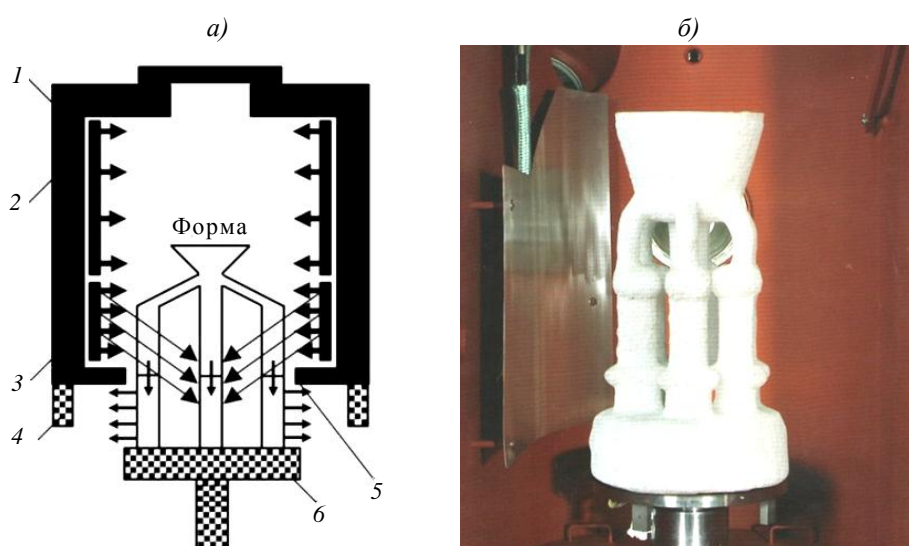


Рис. 2. Схема установки для получения лопаток ГТД с направленной структурой – а: 1 – теплоизоляция; 2 – верхний нагреватель; 3 – нижний нагреватель; 4 – охлаждающее кольцо; 5 – экран; б – охлаждающая плита; б – керамическая форма на кристаллизаторе

В зарубежной практике в процессе изготовления деталей горячего тракта турбин используют установки фирм: Vacuum Industries – установка Consarc в США и Англии (рис. 3); ALD – в Германии, США, Франции, Китае; ULVAC – во Франции. В Германии фирма ALD для этого изготавливает установки ISP 5 DS/SC с емкостью тигля до 5 кг и ISP 10 E/DS/SC с емкостью тигля до 50 кг. При значительном объеме производства деталей линии монтируют из однотипных печей (рис. 4).



Рис. 3. Установка Consarc для прецизионного литья деталей ГТД с равноосной и направленной структурой



Рис. 4. Производственная линия из установок типа ISP 5 DS/SC фирмы ALD

В США активно ведутся работы по созданию энергетических турбин, где используются рабочие лопатки большого размера длиной ~450 мм [7]. В этой связи весьма актуальным является создание технологии и оборудования для их получения.

Для повышения производительности литья крупногабаритных лопаток ГТУ в Германии создана печь VIM-IC 40 E/DS/SC с емкостью тигля до 360 кг (рис. 5), однако из-за больших габаритов теплового узла печи разница температур на границе фронта роста невысокая, что приводит к формированию в отливках крупнодендритной структуры с высоким процентом дендритной пористости и возможным образованием дефектов структуры типа *freckles*.

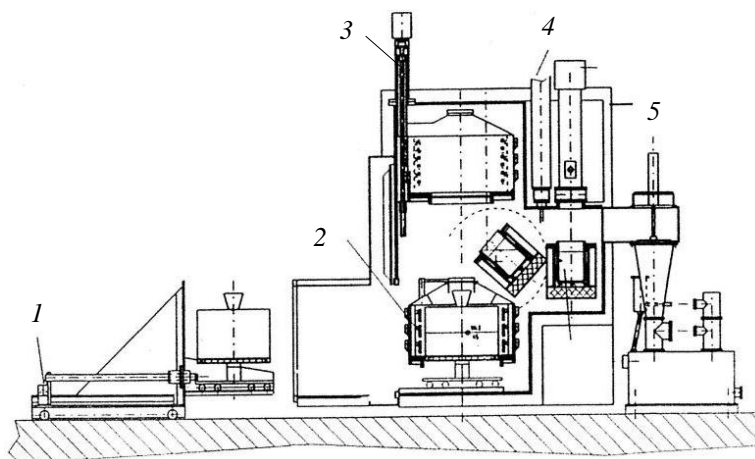


Рис. 5. Принципиальная схема горизонтальной печи VIM-IC 40 E/DS/SC: 1 – устройство перемещения форм; 2 – нагреватель литейной формы; 3 – устройство для подъема и опускания нагревателя; 4 – устройство измерения температуры; 5 – устройство для загрузки шихтовой заготовки

В России в ВИАМ начиная с 1970-х гг. также активно проводились работы по исследованию технологии получения лопаток ГТД методом Бриджмена–Стокбаргера с помощью кристаллизатора. Изготовили несколько установок типа ВИАМ 16-35НК, ВИАМ 16-60НК, УВНЭС-1 и УВНЭС-2 (рис. 6) с медным охлаждаемым кристаллизатором.

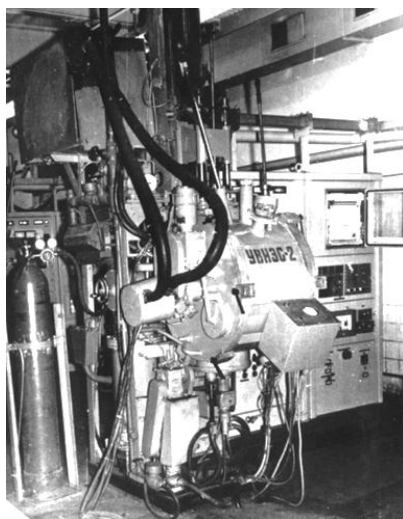


Рис. 6. Плавильно-кристаллизационная установка УВНЭС-2 с медным водоохлаждаемым кристаллизатором

Одновременно с исследованиями по производству лопаток для ГТД методом Бриджмена–Стокбаргера с помощью водоохлаждаемого стола велись работы по применению жидкометаллического охладителя [8]. Метод заключался в применении расплава легкоплавкого металла для охлаждения оболочковой формы с расплавом жаропрочного сплава при ее вертикальном перемещении из области нагрева в область кристаллизации (рис. 7). Более интенсивный отбор тепла с поверхности отливки обеспечивал формирование по всей высоте детали более тонкодендритной структуры, с меньшими ликвационной составляющей сплава и объемной долей междендритной пористости.

Ранее за рубежом проводились исследования по использованию жидкометаллического охладителя [8–10].

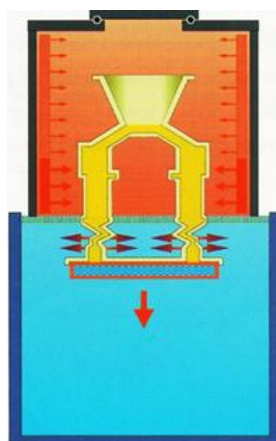


Рис. 7. Принципиальная схема установки с жидкометаллическим охладителем

На производстве оборудования для направленной кристаллизации образцов и деталей ГТД из жаропрочных сплавов с жидкометаллическим охладителем за рубежом специализируется фирма ALD (Германия). Это установки типа Leicomelt 2 DS/SC – LMC (исследовательская) с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова (рис. 8), а также ISP 0,5 DS/SC/LMC и VSP 5 DS/SC/LMC (схема установки приведена на рис. 9). Данные установки активно используются в ряде зарубежных стран: США, Южной Кореи, Германии.

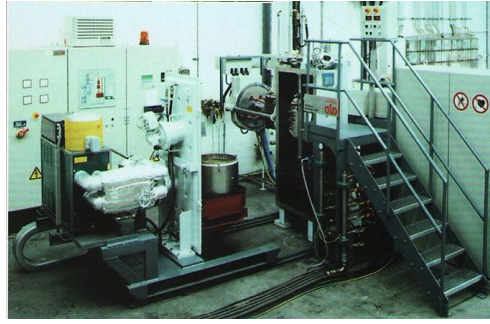


Рис. 8. Исследовательская установка Leicomelt 2 DS/SC – LMC фирмы ALD с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова

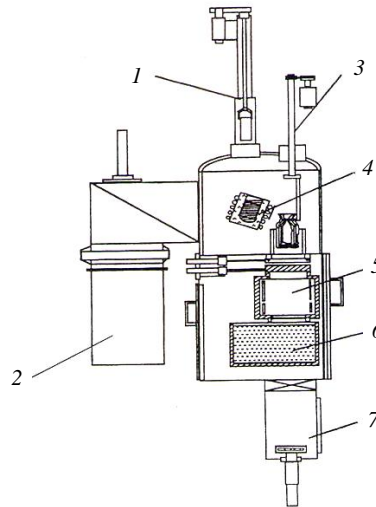


Рис. 9. Схема установки VSP 5 DS/SC/LMC (жидкометаллический охладитель – расплав олова): 1 – механизм для загрузки шихты; 2 – вакуумный насос; 3 – система перемещения отливки; 4 – индукционный тигель для плавки; 5 – нагреватель сопротивления для нагрева формы; 6 – емкость с охладителем; 7 – конструкция перемещения формы на кристаллизаторе

В последующих исследованиях показано, что применение направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем улучшает качество структуры жаропрочных сплавов [11, 12].

Направленная кристаллизация в условиях невысокого температурного градиента приводит к образованию на поверхности отливок структурных дефектов в виде полос структурной ликвации (*freckles*), обогащенных крупными выделениями эвтектической γ' -фазы и карбидов.

Исследования структуры ответственных деталей ГТД, изготовленных на установке VSP 5 DS/SC/LMC с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова, которые выполнялись в Германии в университете Erlangen, убедительно показали, что использование направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе значительно повышает качество структуры отлитых лопаток ГТУ (длиной ~250 мм). Расстояние между дендритами внутри отливки составило $\lambda \approx 300$ мкм, а температурный градиент кристаллизации (судя по структуре) составил $G \approx 30\text{--}40$ °C/см, в отливках отсутствовали ростовые дефекты типа *freckles*. В аналогичных лопатках, отлитых по методу Бриджмена–Стокбаргера на водоохлаждаемом кристаллизаторе, междендритное расстояние составило $\lambda \approx 600$ мкм при температурном градиенте на фронте кристаллизации $G \approx 10$ °C/см [9].

Для производства лопаток ГТУ еще большего размера была создана установка VIM-IC 10 DS/SC/LMC (рис. 10) с емкостью плавильного тигля 25–50 кг и длиной формы до 500 мм.

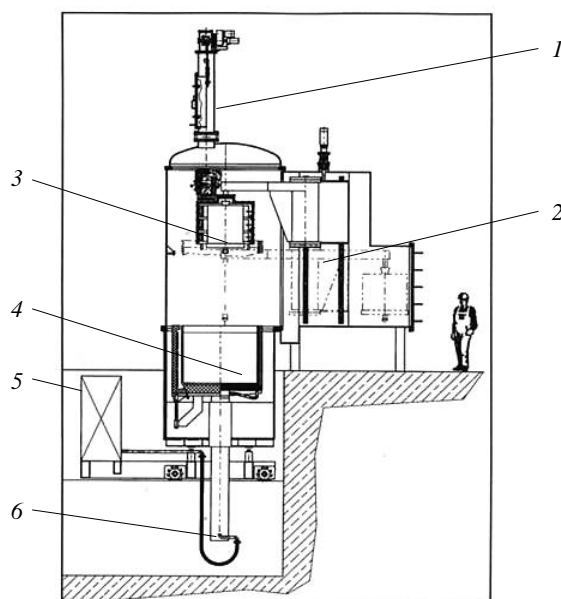


Рис. 10. Установка VIM-IC 10 DS/SC/LMC для литья крупногабаритных лопаток из жаропрочного сплава: 1 – механизм для загрузки шихты и перемещения подвески с формой; 2 – шлюзовая камера для выгрузки печи подогрева формы; 3 – трехзонная печь подогрева формы; 4 – ванна с жидкометаллическим охладителем; 5 – шлюзовая камера для выгрузки ванны с жидкометаллическим охладителем; 6 – механизм для подъема ванн с жидкометаллическим охладителем

Результаты и обсуждение

В Российской Федерации промышленное производство рабочих лопаток с направленной и монокристаллической структурой с применением жидкометаллического охладителя (расплав алюминия) осуществляют на установках типа УВНК-8 и УВНК-9 (образец такой установки представлен на рис. 11), обладающих высокой производительностью и имеющих автоматизированную систему контроля на основе промышленного компьютера [13]. Установки данного типа широко применяются как в России, так и за границей – в Китае и Индии.



Рис. 11. Плавильно-кристаллизационная печь для направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем – расплавом алюминия

Для изготовления деталей из жаропрочных сплавов типа крупноразмерной лопатки ГТУ были созданы установки типа УВНК-10 (рис. 12) и УВНК-15 с охлаждением в расплаве алюминия [14, 15]. Экспериментальные плавки, проведенные на данных установках, показали, что в изготовленных на них изделиях образуется ориентированная структура, но для надежного получения качественной дендритной структуры в изделиях большого размера требуется осуществлять процесс направленного роста в условиях более высокого градиента температур.

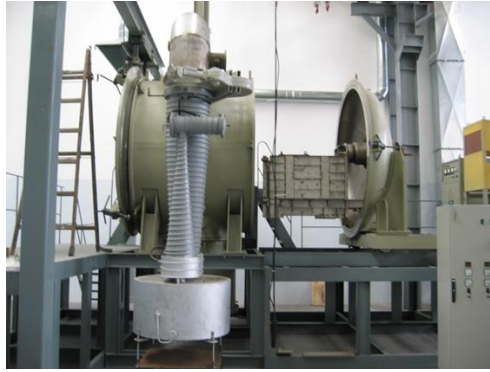


Рис. 12. Плавильно-кристаллизационная печь УВНК-10

На основе многолетних экспериментальных исследований влияния конструктивных элементов печей (конструкция нагревателей, устройство кристаллизаторов и тепловых экранов, а также параметров процесса кристаллизации – температуры охладителя и тепловых режимов, проводимых с использованием термопар, установленных на формах) на структуру отливок удалось создать исследовательские установки типа УВНЭС-3 (рис. 13), а впоследствии – промышленные варианты высокоградиентных печей УВНС-5 и УВНС-6 (рис. 14) с жидкометаллическим охладителем (расплавом олова). Эти установки обладают автоматизированной системой управления на основе ЭВМ. На этом оборудовании удалось обеспечить условия высокоградиентной направленной кристаллизации жаропрочных сплавов при высоком градиенте $G \geq 200$ °C/см.

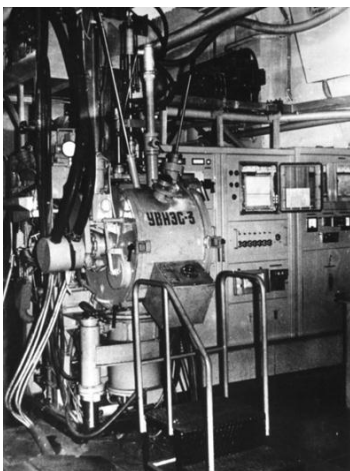


Рис. 13. Установка УВНЭС-3 для направленной кристаллизации с использованием жидкометаллического охладителя – расплава олова



Рис. 14. Промышленная печь УВНС-6 (с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова) со шлюзовой камерой

Особого внимания заслуживает промышленная высокоградиентная установка УВНС-6, имеющая шлюзовую камеру. Промышленная установка предназначена для полунепрерывного литья деталей горячего тракта ГТД с направленной и монокристаллической структурой. Установка оснащена подвижными тепловыми экранами, отделяющими зону нагрева от зоны охлаждения (жидкометаллический охладитель – олово). Технические характеристики установки УВНС-6:

Занимаемая площадь	30 м ²
Потребляемая мощность	200 кВт
Рабочая среда	Вакуум $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. ($6,65 \cdot 10^{-1}$ Па)
Размеры рабочего пространства печи подогрева формы	140×360×400 мм
Масса емкости кристаллизатора с жидким оловом	150 кг
Температура жидкометаллического охладителя	300 °С
Производительность установки	Две формы за один рабочий цикл
Скорость вертикального перемещения оболочковых форм	От 1 до 10 мм/мин

Работы, проведенные для ряда российских и зарубежных жаропрочных сплавов на основе никеля, позволили получать в отливках однородную, тонкодендритную структуру с минимальной дендритной ликвацией и междендритной пористостью. В результате исследований установлены закономерности (в виде уравнений) влияния условий направленного затвердевания на размер дендритов и других элементов структуры жаропрочного сплава. Установлено, что высокоградиентная направленная кристаллизация также обеспечивает повышение уровня служебных свойств жаропрочного сплава [16].

Для исследования процессов направленной кристаллизации и особенностей формирования структуры перспективных высокожаропрочных сплавов, в том числе эвтектических, в России создана высокотемпературная установка УВНЭС-4 (с рабочей температурой в печи подогрева $T_n > 1800$ °С и охладителем – расплавом олова) с автоматизированной системой управления тепловыми и скоростными параметрами процесса направленной кристаллизации на базе промышленного компьютера (рис. 15).



Рис. 15. Установка УВНЭС-4 (с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова)

Создание оборудования для высокоградиентной направленной кристаллизации при высоких температурах, а также создание высокотемпературной керамики

позволило решить проблему использования перспективных высокожаропрочных эвтектических сплавов на никелевой и ниобий-кремниевой основе [17, 18], обладающих более высокими жаропрочными свойствами, чем традиционные никелевые жаропрочные сплавы.

Заключения

Развитие авиационного газотурбинного двигателестроения неразрывно связано с созданием и применением новых высокопрочных материалов, среди которых важное значение имеют металлические жаропрочные сплавы для производства деталей горячего тракта ГТД. Их изготовление требует постоянного совершенствования и создания как новых способов получения, так и специализированного оборудования. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. № 4. С. 31–33.
3. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. М.: Мир, 1967. 172 с.
4. Walston S., Cetel A., MacKay R. et al. Joint development of a fourth generation single crystal superalloys // Superalloys 2004. Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 15–24.
5. Чумаков В.А., Степанов В.М., Иванов Б.Г., Беляева И.Г., Верин А.С., Соболев Г.И. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации // Литейное производство. 1978. № 1. С. 23–24.
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
7. Логунов А.В., Буров М.Н., Данилов Д.В. Развитие энергетического и морского двигателестроения в мире: обзор. Ч. 1 // Двигатель. 2016. № 1 (103). С. 10–13.
8. Giamei A.F., Tschinkel J.G. Liquid Metal Cooling: A New Solidification Technique // Metallurgical Transactions A. 1976. Vol. 7A. P. 1427–1434.
9. Lohmuller A., Eber W., Grobmann J. et al. Improved Quality and Economics of Investment Castings by Liquid Metal Cooling – the Selection of Cooling Media // Superalloys 2000. The Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 181–188.
10. Hugo F., Betz U., Ren J. et al. Casting of Directionally Solidified and Single Crystal Components Using Liquid Metal Cooling (LMC): Results from Experimental Trials and Computer Simulations // International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. VMD-AVS. 1999. P. 16–30.
11. Elliott A.J., Tin S., King W.T. et al. Directional Solidification of Large Superalloy Casting with Radiation and Liquid-Metal Cooling: A Comparative Assessment // Metallurgical and Materials Transactions A. 2004. Vol. 35A. No. 3. P. 3221–3231.
12. Miller J.D., Pollock T.M. Process Simulation for the Directional Solidification of a Tri-Crystal Ring Segment via the Bridgman and Liquid-Metal-Cooling Processes // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. Vol. 43A. P. 2414–2425.
13. Панкратов В.А., Каблов Е.Н. Инкубатор для турбинных лопаток // Наука и жизнь. 1991. № 8. С. 62–64.
14. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. Освоение технологии направленной кристаллизации крупногабаритных отливок на установке УВНК-15 // Литейное производство. 2014. № 3. С. 28–31.
15. 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: 24.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.

16. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
17. Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Ечин А.Б., Нарский А.Р. Направленная кристаллизация, структура и свойства естественного композита на основе эвтектики Nb–Si на рабочие температуры до 1350 °С для лопаток ГТД // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-1-1.
18. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А., Дмитриев Н.С. Литейный интерметаллидный сплав на основе соединения Ni₃Al для турбинных лопаток газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.

References

1. Kablov E.N. *Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
2. Kablov E.N. Developments of VIAM for gas turbine engines and installations. *Krylya Rodiny*, 2010, no. 4, pp. 31–33.
3. Weingard U. *Introduction to the physics of crystallization of metals*. Moscow: Mir, 1967, 172 p.
4. Walston S., Cetel A., MacKay R. et al. Joint development of a fourth generation single crystal superalloys. *Superalloys 2004*. Minerals, Metals & Materials Society, 2004, pp. 15–24.
5. Chumakov V.A., Stepanov V.M., Ivanov B.G., Belyaeva I.G., Verin A.S., Sobolev G.I. Casting technology for gas turbine engine blades using the directional crystallization method. *Liteynoe proizvodstvo*, 1978, no. 1, pp. 23–24.
6. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
7. Logunov A.V., Burov M.N., Danilov D.V. Development of power and marine engine building in the world: a review. Part 1. *Dvigatel*, 2016, no. 1 (103), pp. 10–13.
8. Giamei A.F., Tschinkel J.G. Liquid Metal Cooling: A New Solidification Technique. *Metallurgical Transactions A*, 1976, vol. 7A, pp. 1427–1434.
9. Lohmuller A., Eber W., Grobmann J. et al. Improved Quality and Economics of Investment Castings by Liquid Metal Cooling – the Selection of Cooling Media. *Superalloys 2000*. The Minerals, Metals & Materials Society, 2000, pp. 181–188.
10. Hugo F., Betz U., Ren J. et al. Casting of Directionally Solidified and Single Crystal Components Using Liquid Metal Cooling (LMC): Results from Experimental Trials and Computer Simulations. *International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting*. VMD-AVS, 1999, pp. 16–30.
11. Elliott A.J., Tin S., King W.T. et al. Directional Solidification of Large Superalloy Casting with Radiation and Liquid-Metal Cooling: A Comparative Assessment. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, vol. 35A, no. 3, pp. 3221–3231.
12. Miller J.D., Pollock T.M. Process Simulation for the Directional Solidification of a Tri-Crystal Ring Segment via the Bridgman and Liquid-Metal-Cooling Processes. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, vol. 43A, pp. 2414–2425.
13. Pankratov V.A., Kablov E.N. Incubator for turbine blades. *Nauka i zhizn*, 1991, no. 8, pp. 62–64.
14. Gerasimov V.V., Visik E.M., Kolyadov E.V. Mastering the technology of directional crystallization of large-sized castings at the UVNK-15 unit. *Liteynoe proizvodstvo*, 2014, no. 3, pp. 28–31.
15. 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: March 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.

16. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
17. Bondarenko Yu.A., Kolodyazhnyj M.Yu., Echin A.B., Narskij A.R. Directional solidification, structure and properties of natural composite based on eutectic Nb–Si at working temperatures up to 1350 °C degrees for the blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2018, no. 1 (61), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-1-1.
18. Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Lutskaya S.A., Dmitriev N.S. Foundry intermetallic alloy based on Ni₃Al compound for turbine blades gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 30, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.

Информация об авторах

Бондаренко Юрий Александрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ечин Александр Борисович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сурова Валентина Алексеевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нарский Андрей Ростиславович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yury A. Bondarenko, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander B. Echin, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Andrey R. Narsky, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.04.2023.

The article was submitted 13.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 17.04.2023.