

УДК 621.745.3

*Е.Н. Каблов¹, А.Б. Ечин¹, Ю.А. Бондаренко¹***ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ
НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ЛИТЬЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12

В статье обобщена история развития в России и за рубежом технологии направленной кристаллизации и плавильно-заливочного оборудования для получения лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) из жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурой. Показано, как условия направленной кристаллизации влияют на особенности структуры никелевых жаропрочных сплавов. Приведены характеристики промышленных установок, разработанных во ФГУП «ВИАМ», с компьютерной системой управления параметрами технологического процесса, а также пути их дальнейшего развития.

Ключевые слова: *авиационное двигателестроение, жаропрочные сплавы, лопатки ГТД, направленная кристаллизация, монокристаллическая структура, температурный градиент.*

*E.N. Kablov¹, A.B. Echin¹, Yu.A. Bondarenko¹***HISTORY OF DEVELOPMENT
OF DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION TECHNOLOGY
AND EQUIPMENT FOR CASTING BLADES
OF GAS TURBINE ENGINES**

The paper summarizes the history of the development of technology of directional crystallization and melting and pouring equipment for the production of blades of gas turbine engines from heat-resistant alloys with directional and single-crystal structure in Russia and abroad. It is shown how the conditions of directed crystallization affect the structure of Nickel heat-resistant alloys. The characteristics of industrial plants developed in FSUE «VIAM» with a computer system for controlling the parameters of the technological process, as well as the ways of their further development are given.

Keywords: *aircraft engine building, superalloys, blades of GTE, directed crystallization, single-crystal structure, temperature gradient.*

¹Федеральное 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

Создание в 1940-х гг. авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) послужило стимулом к разработке специальных жаропрочных сплавов для изготовления деталей горячего тракта ГТД. В СССР эти работы были развернуты в ВИАМ под руководством академика С.Т. Кишкина, что инициировало появление гетерофазной теории жаропрочности и показало ключевую роль упрочняющей γ' -фазы на основе интерметаллида Ni_3Al , высокодисперсные частицы которой препятствуют движению дислокаций и тормозят сдвиговую деформацию [1, 2].

В 1950-х гг. в ВИАМ был разработан отечественный деформируемый никелевый жаропрочный сплав ЭИ437, а далее С.Т. Кишкиным продемонстрировано преимущество литейной технологии. Именно благодаря настойчивости ученого первые литейные жаропрочные сплавы были внедрены в изделиях Генерального конструктора, академика Н.Д. Кузнецова.

Исследования зарождения трещин по границам зерен в никелевых жаропрочных сплавах позволили С.Т. Кишкину обосновать необходимость формирования в изделиях ГТД направленных границ зерен, ориентированных параллельно оси главных напряжений. Первые образцы жаропрочного сплава ЖС6К с направленной структурой были получены сотрудниками ВИАМ Г.И. Соболевым и В.А. Чумаковым на ими же созданной экспериментальной установке с использованием медной водоохлаждаемой плиты. В 1970-х гг. в институте профессором Д.А. Петровым были начаты работы по получению образцов из жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой (без границ зерен) с применением затравок с заданной кристаллографической ориентацией.

Материалы и методы направленной кристаллизации

В конце 1960-х – начале 1970-х гг. в ВИАМ с участием В.А. Чумакова были разработаны промышленная технология и оборудование для направленной кристаллизации лопаток ГТД, которые нашли применение при получении целого ряда изделий Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова. Конструктивная особенность этих промышленных установок заключается в том, что рост направленной структуры в изделиях ГТД производился в процессе горизонтального перемещения керамической формы с расплавом металла в графитовой опоке в убывающем по высоте тепловом поле, что обеспечивало существенно более высокую производительность по сравнению с установками по методу Бриджмена, используемыми за рубежом (США, Англия) [3]. Хотя установки ПМП-2 и ПМП-4 (рис. 1) [3, 4] имеют высокую производительность, однако теплоотвод в них недостаточно эффективен из-за того, что литейный блок находится в опоке с наполнителем, что приводит к невысоким продольным температурным градиентам ($G=10-20\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$) и формированию крупнодендритной структуры $\lambda=400-500\text{ мкм}$ (рис. 2, а) с поверхностными ростовыми дефектами (*freckles*). Лопатки, получаемые на установках типа ПМП (проходные методические печи), имеют структуру «случайно столбчатой» ориентации, которую оценивают по допустимым конструкторами эталонам (рис. 3, в).

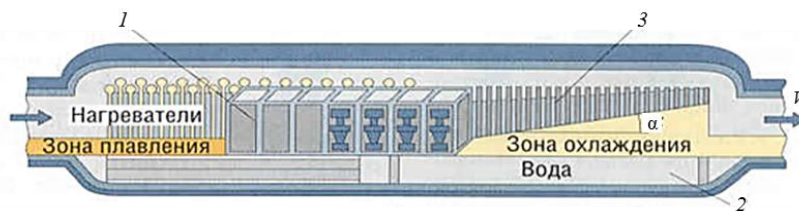


Рис. 1. Схема проходной печи типа ПМП-2:

1 – опоки с литейными блоками; 2 – водоохлаждаемый холодильник; 3 – нагреватель зоны кристаллизации

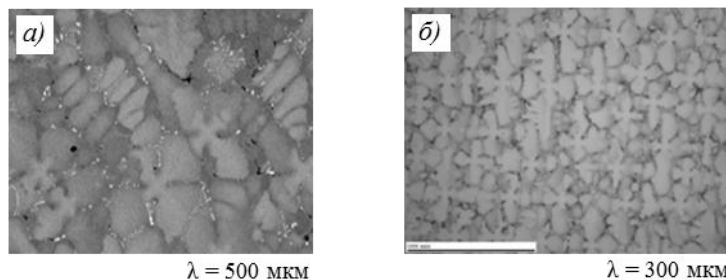


Рис. 2. Макроструктуры, полученные в проходной печи типа ПМП-2 (а) и на плавильно-заливочной установке УВНК-9А (б)

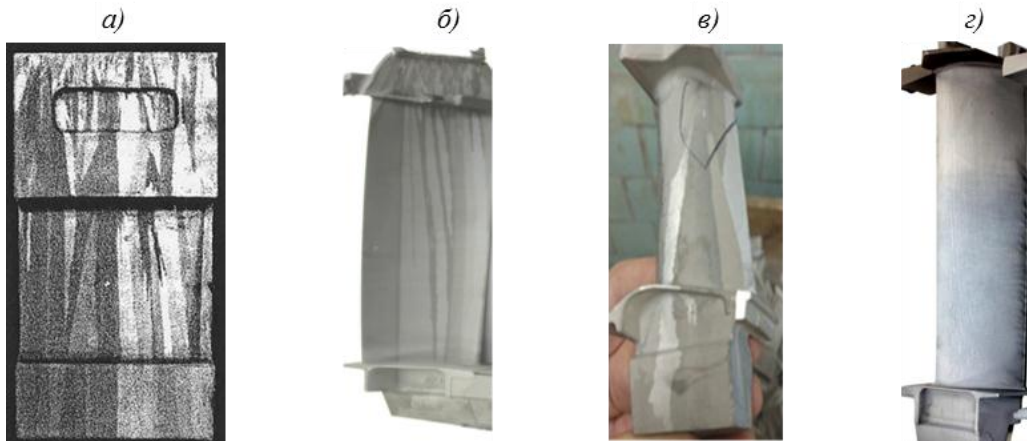


Рис. 3. Сравнение макроструктур, получаемых на разных плавильно-заливочных установках: *а* – направленная структура типа «веник» с крупными кристаллами; *б* – тонкостолбчатая направленная структура; *в* – направленная структура «случайно столбчатой» ориентации; *г* – монокристаллическая структура с ориентацией $\langle 001 \rangle$

Внедрение процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД на установках ПМП-2 инициировало в середине 1970-х гг. проведение фундаментальных исследований по оценке влияния температурно-скоростных условий процесса направленной кристаллизации на структуру и свойства жаропрочных и разработку новых высокожаропрочных сплавов.

За рубежом изготовление лопаток ГТД базируется на методе Бриджмена–Стокбаргера [5–7] (High Rate Solidification – HRS). Внешний вид одной из промышленных установок и ее принципиальная схема представлены на рис. 4.

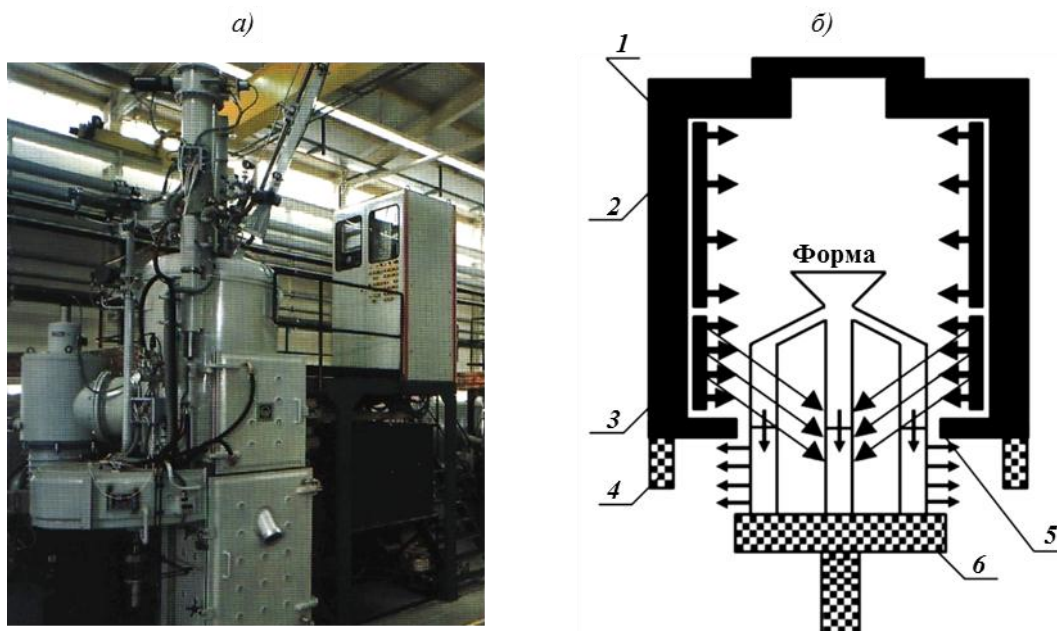


Рис. 4. Общий вид (*а*) и схема работы (*б*) установки для получения лопаток ГТД с направленной структурой типа ISPDC/SC фирмы ALD:

1 – теплоизоляция; *2* – верхний нагреватель; *3* – нижний нагреватель; *4* – охлаждающее кольцо; *5* – экран; *б* – охлаждающая плита

Процесс заключается в том, что в зоне нагрева жаропрочный сплав в вакууме заливают в керамическую форму, установленную на плоском охлаждаемом медном кристаллизаторе, который затем вертикально перемещается в зону охлаждения с заданной скоростью, в результате чего создается перепад температур на фронте кристаллизации. Более интенсивный отвод тепла происходит в нижней части формы через медный кристаллизатор, верхняя же часть охлаждается за счет радиационного теплоотвода, излучением тепла с боковой поверхности формы к стенкам камеры. Радиационный теплоотвод приводит к невысоким скоростям охлаждения отливок, в результате чего формируется структура с крупными размерами как дендритных, так и фазовых составляющих. Расстояние между дендритами в структуре в этом случае составляет около 350–600 мкм, образуются значительная дендритная ликвация и объемная доля микропористости до ~0,8%. Температурный градиент в такого типа установках составляет ~20 °С/см. Данная технология не предусматривает использование затравок для формирования структуры: направленные зерна зарождаются непосредственно от медного кристаллизатора и имеют вид большого количества направленных зерен – структура типа «веник» (рис. 3, а).

Необходимость в более эффективном теплоотводе привела к созданию процесса направленной кристаллизации с жидкометаллическим охлаждением – метод Liquid Metal Cooling (LMC) [8–10]. Основная особенность технологического процесса с использованием жидкометаллического охладителя заключается в том, что залитую расплавленным жаропрочным сплавом форму перемещают вертикально из печи нагрева в зону охлаждения в емкость с расплавом охлаждающего металла. В России для этого используют алюминий или олово. Использование жидкометаллического охладителя значительно повышает скорость теплоотвода: блок отливок охлаждается в ~(3–4) раза эффективнее, чем при охлаждении радиационным теплоотводом с поверхности формы.

Для проведения фундаментальных исследований процесса направленной кристаллизации в ВИАМ были спроектированы и изготовлены экспериментальные установки с применением различных методов охлаждения (УВНЭС-1, УВНЭС-2, УВНЭС-3, УВНЭС-4, ВИАМ-1790), в создании которых участвовали А.Г. Шалимов, Ю.А. Бондаренко и В.В. Герасимов. Проведенные исследования показали, что применение жидкометаллического охладителя обеспечивает более эффективный отвод тепла, увеличивает скорость охлаждения при формировании дендритно-ячеистой структуры в жаропрочных сплавах. Это дало возможность в начале 1980-х гг. создать новое промышленное оборудование – установки типа УВНК-8П с жидкометаллическим охладителем (расплав алюминия) для литья лопаток ГТД методом высокоскоростной [2, 3, 11] направленной кристаллизации (рис. 5). Принцип работы таких установок заключается в следующем. Литейные блоки на подвеске горизонтально помещают в камеру загрузки. После ее вакуумирования керамические формы перемещают в рабочую камеру печи по направляющим, затем соединяют с верхним штоком установки и размещают в печи подогрева на необходимой высоте относительно нижнего нагревателя. За разогревом форм до нужной температуры и сливом расплава следует их перемещение вертикально вниз с регулируемой скоростью в зону охлаждения – емкость с расплавом алюминия. По окончании погружения форм в жидкий алюминий нагреватели выключают, керамические формы поднимают вверх, а затем горизонтально перемещают в шлюзовую камеру. Данная технология нашла широкое применение при литье лопаток ГТД из промышленных жаропрочных сплавов, а установки типа УВНК-8П используют на большинстве предприятий АО «ОДК» при производстве лопаток для двигателей целого ряда изделий генеральных конструкторов А.М. Люльки, В.Я. Климова и других (рис. 5) [12, 13]. В этих установках температурный градиент на фронте кристаллизации составляет $G=50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$ против $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$ по технологии направленной кристаллизации

на медном охлаждаемом кристаллизаторе (метод Бриджмена). Структура лопаток зарождается от монокристаллических затравок с ориентацией $\langle 001 \rangle$ и является монокристаллической (рис. 3, з).

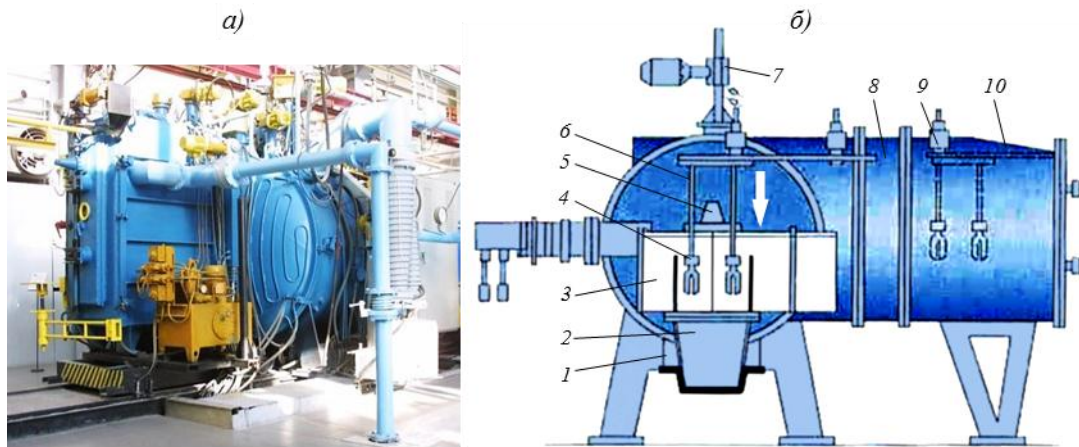


Рис. 5. Общий вид (а) и схема работы (б) печи УВНК-8П для направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем:

1 – корпус печи; 2 – ванна с жидкометаллическим охладителем; 3 – нагреватель; 4 – оболочковые формы; 5 – плавильная печь; 6 – подвеска с формами; 7 – механизм вертикального перемещения; 8 – вакуумный затвор; 9 – механизм горизонтального перемещения форм; 10 – шлюзовая камера

Последующие исследования, проведенные в ВИАМ Е.Н. Кабловым и Ю.А. Бондаренко с начала 1990-х гг., позволили разработать научные основы технологического процесса высокоградиентной направленной кристаллизации никелевых монокристаллических жаропрочных сплавов [9, 14, 15]. Суть процесса заключается в том, что направленная дендритная структура в сплавах формируется на фронте кристаллизации в жидко-твердой зоне в интервале температур между T_S и T_L , а протяженность смешанной зоны определяется значением температурного градиента на фронте роста. В ходе исследований разработана экспериментальная методика оценки значений температурного градиента с помощью термодпар, установленных как внутри формы, так и на ее внешней стороне.

Результаты и обсуждение

Детальные исследования влияния температурно-скоростных условий направленного роста, а также способов направленной кристаллизации (рис. 6) на особенности формирования ориентированной дендритно-ячеистой структуры высокожаропрочных сплавов позволили установить, что при отводе тепла за счет только радиального охлаждения с внешней поверхности формы (величина жидко-твердой зоны достаточно велика – рис. 7, а) происходит формирование крупнодендритной структуры с развитыми осями дендритов (рис. 8, а, в). Это сопровождается дендритной ликвацией легирующих элементов относительно осей дендритов и межосного пространства. По мере роста дендритов в их основании при кристаллизации остатков расплава из-за разности объемов жидкой и твердой фаз образуются дендритные поры. При невысоком температурном градиенте на поверхности отливки также может формироваться «струйчатая полосчатость» в виде цепочек равноосных зерен (*freckles*), ориентированных в направлении кристаллизации, состоящих из избыточных выделений эвтектических фаз жаропрочных сплавов [3].

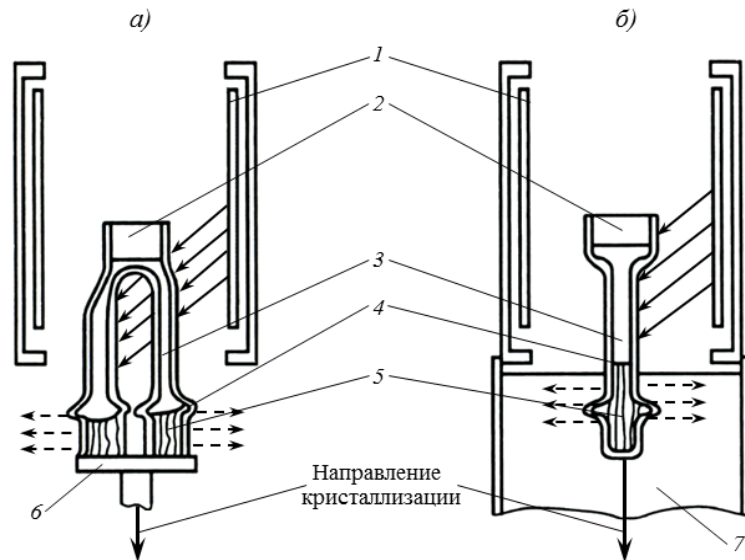


Рис. 6. Направленная кристаллизация лопаток ГТД (схема) традиционным методом Бриджмена (а) и с жидкометаллическим охладителем (б):

1 – нагреватель; 2 – керамическая форма; 3 – жидкий расплав; 4 – фронт кристаллизации; 5 – твердый сплав; 6 – кристаллизатор; 7 – охладитель из легкоплавкого металла; →, --- → – подвод и отвод тепла соответственно

При формировании направленной структуры с использованием охладителя из легкоплавкого металла в условиях конвективного охлаждения поверхность детали охлаждается в 3–4 раза эффективнее, что обеспечивает уменьшение высоты жидко-твердой зоны на фронте роста (рис. 7, б) и в жаропрочном сплаве кристаллизуется структура с меньшими по размеру дендритами (рис. 8, б, в), меньшей микропористостью и дендритной ликвацией [10, 15, 16]. Эти главные результаты нашли свое подтверждение в работах, выполненных в ВИАМ по контрактам с зарубежными исследователями на их сплавах Rene N5, CMSX-4 и GTD-111 с направленной структурой [17], при создании оборудования для получения крупногабаритных лопаток энергетических турбин. По заключению специалистов фирмы General Electric (США), высокоградиентная технология, разработанная в ВИАМ, в 30 раз эффективнее технологии, применяемой в промышленности США.

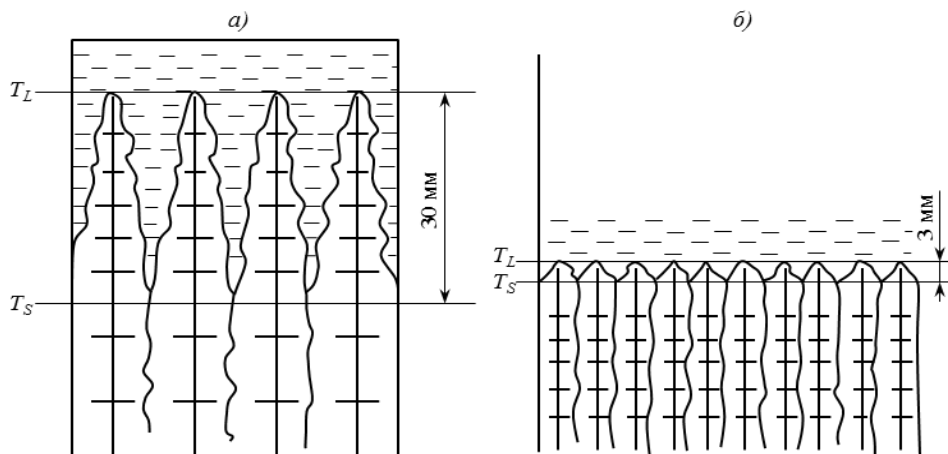


Рис. 7. Схема роста дендритной структуры при разных температурных градиентах (T_S и T_L – температуры солидус и ликвидус соответственно):

а – $G=30$ °C/cm; б – $G=200$ °C/cm

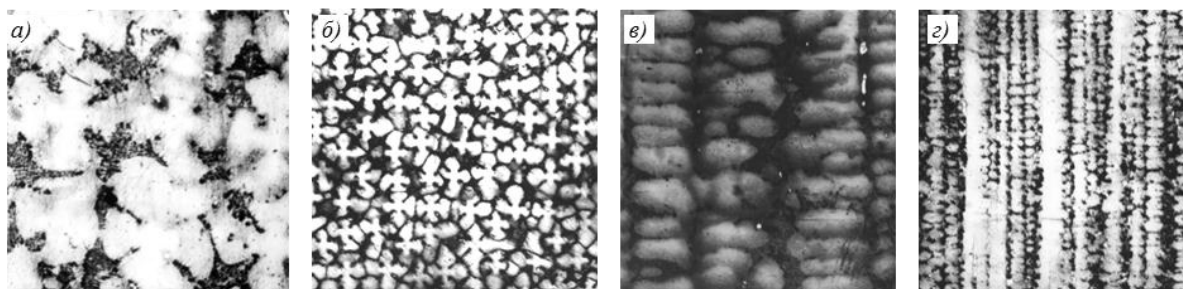


Рис. 8. Характер структуры (*а, б* – поперечная; *в, з* – продольная) жаропрочного сплава, формирующейся при температурных градиентах 30 (*а, в*) и 200 °С/см (*б, з*)

Экспериментально были установлены главные факторы, влияющие на реализацию высокоградиентного процесса: высокая температура в расплаве перед фронтом кристаллизации, максимальный теплоотвод ниже фронта роста, минимальная температура расплава охладителя, использование эффективных тепловых экранов между нагревателем и охладителем, минимальное расстояние между нагревателями и охладителем, применение керамической формы с хорошей теплопроводностью [10].

Результаты исследований позволили модернизировать существующие установки, а также создать промышленные образцы высокоградиентных установок УВНС-5 и УВНС-6 [18], которые могут быть использованы для литья лопаток из более жаропрочных сплавов на основе эвтектических композитов, в том числе на основе никеля и системы Nb–Si. Показано, что сплавы системы Nb–Si по уровню жаропрочности при температуре 1200 °С в 2 раза превосходят традиционные никелевые жаропрочные сплавы с монокристаллической структурой [9, 10, 19].



Технические характеристики установки УВНК-9А:

Потребляемая мощность, кВт	250
Рабочая среда: вакуум, Па (мм рт. ст.)	0,65 ($5 \cdot 10^{-3}$)
Масса металла в тигле, кг	10–15
Температура металла в тигле, °С	1700
Температура в печи подогрева формы, °С	1650
Емкость кристаллизатора с жидким алюминием, кг	80
Температура жидкометаллического охладителя, °С	750–800
Скорость вертикального перемещения, мм/мин	0,1–10; 1,4–170
Размеры формы, мм	130×260×350
Максимальный температурный градиент, °С/см	60–80
Производительность, лопатки/сут (блок 6 лопаток)	До 144
Занимаемая площадь, м ²	48

Рис. 9. Установка УВНК-9А

С 1998 г. осуществлена модернизация установки УВНК-8П, связанная с разработкой автоматизированной системы управления на базе промышленного компьютера. Компьютерная система управления обеспечивала проведение технологического процесса по заданной программе, осуществляя контроль главных технологических параметров – температуры, скорости кристаллизации, а также отображение в реальном масштабе времени технических данных о работе установки. На экране дисплея компьютера, а также на жестком диске фиксируются основные параметры процесса: мощность нагревателей, вакуум в плавильно-кристаллизационной камере, температура расплава в тигле, изменения температуры в зонах печи, температура в ванне с расплавом охладителя, скорость перемещения блока форм при их кристаллизации [20–22]. Плавильно-заливочные установки УВНК-9А (рис. 9) используются как в России (АО «КМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «Кузнецов»), так и за рубежом – АО «Мотор Сич» (Украина), HAL (Индия).

Заключения

В 2019 г. в соответствии с техническим заданием ПАО «ОДК-Сатурн» изготовлены и поставлены пять установок УВНК-11 (рис. 10), которые имеют следующие отличительные особенности по отношению к установке УВНК-9А.

1. Печь подогрева форм (ППФ) имеет длину на 300 мм больше, что увеличивает количество заливаемых отливок за плавку и тем самым повышает производительность установки на 30%. Размеры внутреннего пространства ППФ позволяют одновременно заливать до трех форм.

2. Электропитание и управление верхних нагревателей ППФ разделены. Каждый нагреватель имеет свой трансформатор и систему регулирования нагревом, что повышает точность поддержания температуры в ППФ независимо от изменения электрических характеристик композитных нагревателей в процессе работы.

3. Кристаллизатор установлен на тележке, под которой находится охлаждаемый медный подъемный стол, поднимающийся до контакта с кристаллизатором в нужный момент времени для отвода тепла от него. Подъем осуществляется автоматически по показаниям термодатчика жидкометаллического кристаллизатора при достижении критической температуры алюминия (критическая температура задается в системе управления). Это позволяет уменьшить время расплавления алюминия при первой плавке с холодной ППФ и обеспечить поддержание заданной температуры кристаллизатора – тем самым косвенно управлять величиной температурного градиента.

4. Увеличенная мощность тиристорного преобразователя частоты до 250 кВт и конструкция установки дают возможность в перспективе использовать тигель большей емкости (до 25 кг).



Технические характеристики установки УВНК-11:

Максимальная потребляемая мощность, кВт	430
Рабочая среда при плавке: вакуум, Па (мм рт. ст.) (не более)	0,65 ($5 \cdot 10^{-3}$)
Масса металла в тигле, кг (не более)	15
Максимальная температура металла в тигле, °С	1750
Максимальная температура в печи подогрева форм, °С	1750
Размер рабочего пространства печи подогрева форм, мм	788×180×480
Скорость вертикального перемещения форм:	
– рабочий ход, мм/мин	От 0,45 до 170
– маршевая, мм/мин (не более)	250
Температура кристаллизатора, °С	От 690 до 750
Масса алюминия в кристаллизаторе, кг	200+5
Производительность печи, шт. плавок/сут	До 4
Количество охлаждающей воды, м ³ /ч	От 12 до 18
Занимаемая площадь, м ² (не более)	42
Масса печи общая, кг (не более)	15000

Рис. 10. Установка УВНК-11

На установках УВНК-11 отливают лопатки как с монокристаллической структурой (рис. 3, а) с использованием монокристаллических затравок [001] цилиндрической формы из сплава системы Ni–W размером $\varnothing 8 \times 5$ мм, так и с направленной тонкостолбчатой структурой (рис. 3, б), формируемой от затравок прямоугольной формы из сплава системы Ni–W размером $30 \times 15 \times 4$ мм (неориентированная КГО – не менее 5 зерен с разориентацией не более 13 градусов).

В настоящее время на таких установках отливают: рабочие лопатки двигателя НК-32 серии Е из сплава ЖС6Ф-ВИ; рабочие лопатки двигателя Д18 из сплава ЖС26-ВИ; опытные партии рабочих лопаток двигателей SAM и Lear.

Библиографический список

1. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 272 с.
2. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
3. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
4. Чумаков В.А., Степанов В.М., Верин А.С. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации // Литейное производство. 1978. №1. С. 23–24.
5. Apparatus for Casting of Directionally Solidified Articles: pat. US3763926; filed 15.09.71; publ. 09.10.73.
6. Method and apparatus for melting and casting metal: pat. US3841384; filed 30.01.73; publ. 12.11.74.
7. Apparatus and Method for Directional Solidification: pat. US3897815; filed 01.11.73; publ. 05.08.75.
8. Giamei A.F., Tschinkel J.G. Liquid Metal Cooling: A New Solidification Technique // Metallurgical Transactions A. 1976. Vol. 7A. P. 1427–1434.
9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
10. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
11. 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.-техн. журн. 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2019).
12. Строганов Г.Б., Логунов А.В., Герасимов В.В. и др. Высокоскоростная направленная кристаллизация // Литейное производство. 1983. №12. С. 20–22.
13. Герасимов В.В., Морозова Г.И., Тарасова И.М. О химической природе «вскипов» при производстве монокристаллических лопаток из жаропрочных никелевых сплавов // Технология металлов. 2000. №7. С. 7–8.
14. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа RENE-N5 // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. №2. С. 15–18.
15. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. №7. С. 20–23.
16. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
17. Hugo F., Betz U., Ren J., Huang S.-C., Bondarenko J. Casting of directionally solidified and single crystal components using liquid metal cooling (LMC): Results from experimental trials and computer simulations // Proceeding International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Santa Fe: VMD AVS, 1999. P. 16–30.
18. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Новая промышленная высокоградиентная установка УВНС-6 для получения лопаток и других деталей ГТД из литейных жаропрочных и интерметаллидных

- сплавов с монокристаллической структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4. С. 31–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-31-36.
19. Раевских А.Н. Исследование микроструктуры и свойств ниобий-кремниевого эвтектического композита, полученного при направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе // *Вопросы материаловедения*. 2017. №2 (90). С. 68–76.
 20. Герасимов В.В., Колядов Е.В. Технические характеристики и технологические возможности установок УВНК-9А и ВИП-НК для получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов // *Литейщик России*. 2012. №11. С. 33–38.
 21. 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.
 22. 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.