



УДК 629.7.03-226.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-3-3

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ
НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СОВРЕМЕННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ
ПРОИЗВОДСТВЕ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

А.Б. Ечин

Ю.А. Бондаренко

доктор технических наук

Декабрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

А.Б. Ечин¹, Ю.А. Бондаренко¹

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрено влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структурные составляющие суперсплавов. Показана промышленная высокоградиентная установка УВНС-6 и ее преимущества. Проведено микроструктурное исследование образцов, полученных на установке УВНС-6, с замером междендритного расстояния. Определен температурный градиент экспериментальным методом.

Ключевые слова: *направленная кристаллизация, междендритное расстояние, температурный градиент, микроструктура, лопатки.*

A.B. Echin, Y.A. Bondarenko

MODERN EQUIPMENT FOR TURBINE BLADES PRODUCTION DESIGNED WITH A GLANCE OF HIGH-GRADIENT DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS

An influence of the high-gradient directional crystallization on the structural features (interdendritic distance and porosity) of the superalloys is presented in the paper. The industrial-scale high-gradient unit of UVNS-6 type and some benefits of its use are shown as well. Studies of some test specimens manufactured on UVNS-6 unit completed with measurement of the interdendritic distance were carried out. The temperature gradient was estimated by experimental method.

Keywords: *directional crystallization, interdendritic distance, temperature gradient, microstructure, turbine blades.*

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

В настоящее время в промышленности литье монокристаллических рабочих лопаток проводят с невысоким температурным градиентом в печах типа УВНК [1, 2], поэтому высота жидко-твердой области на фронте кристаллизации составляет десятки миллиметров. Вследствие перекрытия осями второго порядка дендритных каналов течение расплава в них затруднено; ввиду различия молярных объемов жидкой и твердой фаз по мере кристаллизации в основании дендритов формируются дендритные поры [3]. В результате в отливках формируется структура с крупными дендритными и фазовыми составляющими, значительной дендритной ликвацией и междендритной пористостью [4, 5]. Повышение температурного градиента обеспечивает уменьшение высоты жидко-твердой зоны перед фронтом кристаллизации, что облегчает подпитку расплавом оснований дендритов и, следовательно, способствует уменьшению размера и количества междендритных пор.

Для решения проблемы существенного повышения качества структуры, обеспечения ее однородности, уменьшения дендритной ликвации и пористости специалисты ВИАМ занялись разработкой процесса высокоградиентной направленной кристаллизации жаропрочных сплавов [6, 7]. Были спроектированы и изготовлены специализированные вакуумные плавильные установки направленной кристаллизации с различными способами охлаждения (УВНЭС-1, УВНЭС-2, УВНЭС-3). Их общей особенностью были близкие по размеру конструкции теплового узла, рассчитанные на одновременную кристаллизацию блока образцов или одной-двух лопаток (длиной ~150–200 мм). Информация о характере распределения температуры, полученная с помощью термопар, установленных на поверхности керамических форм, позволила оценить значения температурного градиента и изменения положения фронта роста в процессе направленной кристаллизации. Анализ полученных результатов показал, что направленная кристаллизация в керамических формах на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе (метод Бриджмена) вследствие недостаточно эффективного отвода тепла излучением с поверхности формы обеспечивает незначительные изменения температурного градиента на фронте кристаллизации ($G=30\text{--}40^\circ\text{C}/\text{см}$). Применение водоохлаждаемых кольцевых экранов в нижней части печи подогрева форм (установка УВНЭС-2) обеспечило некоторое увеличение значений температурного градиента – до $G=50\text{--}60^\circ\text{C}/\text{см}$. Применение жидкометаллического охладителя (расплава олова) в установке УВНЭС-3 (метод ЛМС) обеспечило повышение температурного градиента – до $G=80^\circ\text{C}/\text{см}$. Дальнейшее совершенствование конструкции печи с жидкометаллическим охладителем благодаря ис-

пользованию двухзонного нагревателя, тепловых экранов, а также повышение рабочей температуры в печи подогрева форм (до 1700°C) путем использования более огнеупорных бескремнеземных керамических форм, состоящих практически полностью из оксида алюминия (99,6% (по массе) Al_2O_3), обеспечило рост значений температурного градиента – до $G=200\text{--}250^\circ\text{C}/\text{см}$ [4, 5].

Проведенные исследования позволили сформулировать и экспериментально подтвердить основные требования, необходимые для получения высокого температурного градиента на фронте кристаллизации при литье лопаток ГТД: применение метода направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем, использование жидкометаллического охладителя с более низкой температурой плавления, повышение рабочей температуры в печи подогрева, уменьшение расстояния между нагревателем и поверхностью жидкометаллического охладителя, применение эффективных тепловых экранов между зоной нагрева и зоной охлаждения, повышение теплопроводности керамических форм [8–10]. Основываясь на этих принципах создана лабораторная вакуумная высокоградиентная плавильная установка УВНЭС-4, на которой экспериментально установлены закономерности влияния высоких значений температурного градиента на междендритное расстояние, пористость и коэффициент ликвации в жаропрочных никелевых сплавах [11].

Цель работы заключается в оценке температурного градиента на промышленной установке УВНС-6.

Материалы и методы

Образцы для исследований экспериментальных зависимостей влияния температурного градиента на междендритное расстояние, пористость и коэффициент ликвации получили методом liquid metal cooling (LMC) на установке УВНЭС-4. В качестве охладителя использовали расплав олова. Из слитков жаропрочного сплава третьего поколения типа ВЖМ1 [12] изготовлены цилиндрические монокристаллические образцы $\varnothing 5$ мм (при одинаковых скоростях кристаллизации 5 мм/мин, но с различным температурным градиентом на фронте роста).

Оценку температурного градиента осуществляли на промышленной высокоградиентной установке УВНС-6 полунепрерывного действия (рис. 1). Установка имеет подвеску, на которую помещается два блока форм, и шлюзовую камеру, что позволяет увеличить ее производительность. Установка снабжена подвижными тепловыми экранами, отделяющими зону нагрева от зоны охлаждения (жидкометаллический охладитель – олово), в результате чего достигается значительный перепад температур между этими

зонами [13–15]. Установка оснащена системой управления основными параметрами технологического процесса на основе промышленного компьютера. Технические характеристики установки представлены в табл. 1.



Рисунок 1. УВНС-6 – промышленная высокоградиентная установка со шлюзовой камерой

Таблица 1

Технические характеристики установки УВНС-6

Потребляемая мощность, кВт	200
Рабочая среда: вакуум, Па (мм рт. ст.)	$6,65 \cdot 10^{-1}$ ($5 \cdot 10^{-3}$)
Масса металла в тигле, кг	15
Температура металла в тигле, °С	1700
Температура в печи подогрева формы, °С	1700
Скорость вертикального перемещения, мм/мин	1–10
Размеры рабочего пространства печи подогрева формы, мм	140×360×400
Максимальный температурный градиент, °С/см	150–200
Емкость кристаллизатора с жидким оловом, кг	150
Температура жидкометаллического охладителя, °С	300
Производительность, форм/рабочий цикл	2
Занимаемая площадь, м ²	30

Известно, что основная структурная характеристика – расстояние между дендритными осями первого порядка λ (мкм) – связана со скоростью охлаждения расплава соотношением:

$$\lambda = a(GR)^{-0,32},$$

где a – коэффициент, пропорциональный интервалу кристаллизации; G – температурный градиент; R – скорость кристаллизации [16].

Из этого соотношения видно, что чем больше температурный градиент, тем меньше междендритное расстояние.

Для оценки качества структуры, получаемой на промышленной установке УВНС-6, проведено исследование микроструктуры отлитых образцов с замером междендритного расстояния (МДР). Экспериментальные плавки осуществлялись в керамические формы, изготовленные по промышленной технологии точного литья из электрокорунда и связующего на основе SiO_2 . Установка вакуумировалась, печь подогрева форм нагревалась до температуры 1580°C , шихтовая заготовка жаропрочного сплава типа ВЖМ1 расплавлялась в плавильном индукционном тигле, при температуре $T_{\text{Me}}=1600^\circ\text{C}$ расплав заливался в керамическую форму. Затем форма с расплавом вертикально перемещалась из печи подогрева форм в ванну с жидкометаллическим охладителем с постоянной скоростью кристаллизации ($R_{\text{кр}}=5$ мм/мин). Температура жидкометаллического охладителя составляла 300°C .

Из полученных заготовок выбрали образцы (рис. 2) для исследования микроструктуры: образец 1 соответствовал нижней, 2 – средней, 3 – верхней части заготовки.

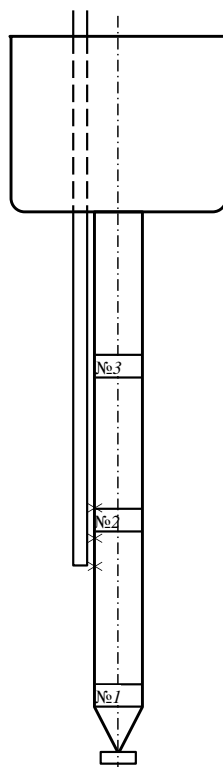


Рисунок 2. Схемы установки термопар на керамической форме и резки заготовки под образцы

В экспериментах использованы три вольфрамрениевые термопары ВР 5/20 (на рис. 2 отмечены крестиками), которые закреплялись на поверхности формы в ее центральной части на расстоянии ~ 10 мм друг от друга. Термопары на поверхности формы крепились при помощи суспензии на основе электрокорунда и связующего на основе SiO_2 . При направленной кристаллизации форма с термопарами перемещалась из зоны нагре-

ва в зону охлаждения. Показания термопар фиксировались и записывались на жесткий диск компьютера.

Оценку МДР выполняли на шлифах образцов 1, 2 и 3 после травления. В качестве междендритного расстояния принимали расстояние между центрами осей дендритов первого порядка, измеренное вдоль кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$. С целью минимизации погрешности измерения область для количественного анализа МДР на шлифе выбирали таким образом, чтобы выходы осей дендритов первого порядка располагались ровными рядами. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты количественного анализа междендритного расстояния (МДР) в образцах

Место вырезки образца	Количество измерений N	МДР, мкм
Низ	117	215,2±3,0
Середина	144	210,7±3,1
Верх	73	203,6±4,0

Результаты

Влияние температурного градиента на МДР, пористость и коэффициент ликвации в жаропрочных никелевых сплавах

Экспериментально на установке УВНС-4 определены зависимости влияния температурного градиента на МДР и пористость (рис. 3 и 4).

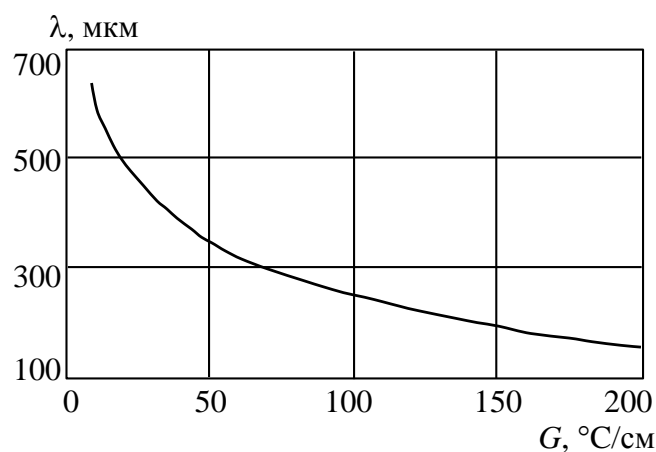


Рисунок 3. Влияние температурного градиента (G) на междендритное расстояние (λ)

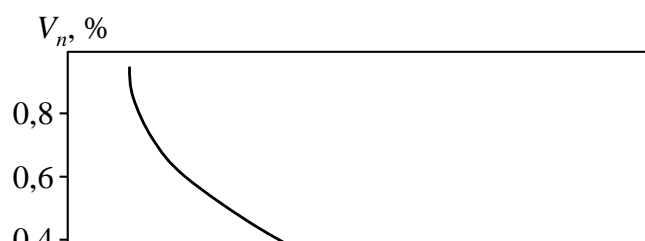


Рисунок 4. Влияние температурного градиента (G) на объемную долю пор (V_n): 1 – образцы после термообработки, 2 – в литом состоянии

Такие элементы, как Al и Ta – обогащают межосное пространство, а W и Re – концентрируются в осях дендритов. Повышение температурного градиента способствует уменьшению неоднородности химического состава, вызванной дендритной ликвацией. В монокристаллах, полученных методом высокоградиентной направленной кристаллизации на установке УВНЭС-4, коэффициент ликвации рения на 30% ниже, чем в монокристаллах, полученных методом направленной кристаллизации (НК) на установке УВНК-9. Это особенно важно для современных жаропрочных сплавов, содержащих W и Re, так как в них даже длительная высокотемпературная гомогенизация не устраняет химической неоднородности внутри дендритной ячейки [17].

Микроструктуры

Проведенные металлографические исследования образцов 1, 2 и 3 (рис. 5) показали, что после направленной кристаллизации на установке УВНС-6, по всей высоте отливки формируется однородная тонкодендритная структура с МДР $\lambda \approx 210$ мкм.

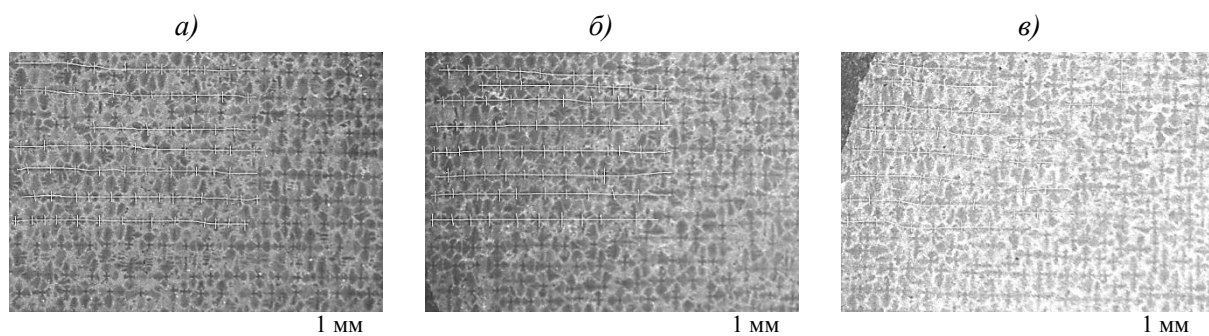


Рисунок 5. Микроструктура ($\times 25$) нижней 1 (а), средней 2 (б) и верхней 3 части заготовки (в) с прорисованными дендритами для замера междендритного расстояния

Оценка температурного градиента

На основании полученных с помощью термопар данных построены кривые распределения температуры по высоте теплового узла печи (рис. 6). Полученные кривые имеют характерный вид для экспериментов, осуществляемых на установках типа УВНС.

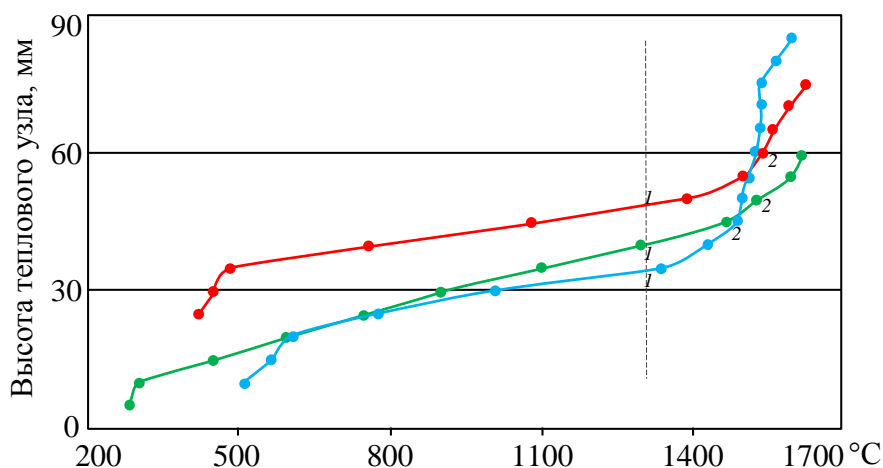


Рисунок 6. Кривые распределения температуры по высоте теплового узла

Для определения температурного градиента на кривых выбрана точка 1, соответствующая температуре солидус сплава. Затем выбрана точка 2, с помощью которой определялась температура на 1 см выше температуры солидус сплава. Разница между температурой, полученной в точке 2, и температурой солидус сплава и позволила определить значение температурного градиента на фронте роста. Результаты показаний термопар, зафиксированных через 5 мм, и изображение их графически в виде кривых свидетельствуют, что значение температурного градиента для установки УВНС-6 составило $G \approx 180\text{--}200^\circ\text{C}/\text{см}$.

Обсуждение и заключения

Высокоградиентная технология направленной кристаллизации обеспечивает более однородную структуру с наименьшими междендритным расстоянием и объемной долей пористости.

Промышленная установка УВНС-6 позволяет достичь высоких значений температурного градиента, что, в свою очередь, ведет к повышению качества структуры получаемых на ней изделий. Отливки, полученные на этой установке, имеют однородную тонкодендритную структуру с МДР $\lambda \approx 210$ мкм.

Высокоградиентная технология литья лопаток и других деталей горячего тракта ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов открывает перспективы создания новых, более совершенных ГТД с повышенными мощностью, ресурсом и топливной

эффективностью [18]. Необходимо добавить, что в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» планируется дальнейшее развитие технологии высокоградиентной направленной кристаллизации [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
2. Беликов А.В., Герасимов В.В., Висик Е.М. Технология получения образцов для аттестации жаропрочных сплавов, выплавленных с применением отходов литейного производства заводов отрасли //Труды ВИАМ. 2013. №6. Ст. 02 (viam-works.ru).
3. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука. 2006. 632 с.
4. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя //Литейное производство. 2011. №5. С. 36–39.
5. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. О направленной кристаллизации крупногабаритных отливок на установке УВНК-15 //Литейное производство. 2013. №3. С. 21–23.
6. 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.
7. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б. и др. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В //Литейное производство. 2012. №6. С. 12–16.
8. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Влияние температурного градиента на фронте роста на структуру жаропрочного сплава при направленной кристаллизации //Литейщик России. 2014. №5. С. 24–27.
9. 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.

10. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
11. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. Влияние условий направленной кристаллизации на структуру деталей типа лопатки ГТД //Литейное производство. 2012. №7. С. 14–16.
12. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Сидоров В.В., Демонис И.М. Разработка монокристаллических высокорениевых жаропрочных никелевых сплавов методом компьютерного конструирования /В кн.: Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. М.: Наука. 2006. С. 79–97.
13. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Промышленная высокоградиентная установка направленной кристаллизации УВНС-6 //Металлургия машиностроения. 2013. №3. С. 32–34.
14. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Новая промышленная высокоградиентная установка направленной кристаллизации УВНС-6, ее характеристики и преимущества //Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №2 (materialsnews.ru).
15. 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 (в печати).
16. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.
17. Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Каблов Е.Н. и др. Особенности структурно-фазовых превращений при термической обработке монокристаллов высокорениевых жаропрочных никелевых сплавов /В кн.: Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. М.: Наука. 2006. С. 142–154.
18. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. и др. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 20–25.
19. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M., Demonis I.M. Rol' napravlennoj kristallizacii v resursosberegajushhej tehnologii proizvodstva detalej GTD [The role of directional solidification in the resource-saving technology of production of gas-turbine] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 01 (viam-works.ru).
2. Belikov A.V., Gerasimov V.V., Visik E.M. Tehnologija poluchenija obrazcov dlja attestacii zharoprochnyh splavov, vyplavlennyh s primeneniem othodov litejnogo proizvodstva zavodov otrasli [The technology of obtaining samples for certification superalloys melted using foundry waste branch factories] //Trudy VIAM. 2013. №6. St. 02 (viam-works.ru).
3. Litye lopatki gazoturbinnih dvigatelej: splavy, tehnologii, pokrytija [Alloy blades of gas turbine engines: alloys, technology, coatings] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. 2-e izd. M.: Nauka. 2006. 632 s.
4. Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. O napravlennoj kristallizacii zharoprochnyh splavov s ispol'zovaniem ohladitelja [About the directional solidification of superalloys using cooler] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №5. S. 36–39.
5. Gerasimov V.V., Visik E.M., Koljadov E.V. O napravlennoj kristallizacii krupnogabaritnyh otlivok na ustanovke UVNK-15 [About the directional solidification of large castings for installation UVNK-15] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №3. S. 21–23.
6. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of the gas turbine engine blades superalloys with a single-crystal structure and composition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
7. Bondarenko Ju.A., Bazyleva O.A., Echin A.B. i dr. Vysokogradientnaja napravlennaja kristallizacija detalej iz splava VKNA-1V [High-gradient directional solidification of an alloy parts VKNA-1B] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 12–16.
8. Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. Vlijanie temperaturnogo gradienta na fronte rosta na strukturu zharoprochnogo splava pri napravlennoj kristallizacii [The influence of the temperature gradient at the growth front on the structure of superalloy with directional solidification] //Litejshhik Rossii. 2014. №5. S. 24–27.
9. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov <001> vysokorenievogo nikelovogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Structure and

- properties of single crystals of high-temperature $\langle 001 \rangle$ high-rhenium nickel superalloy obtained under high-gradient directional solidification] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
10. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Napravlenaja kristallizacija zharoprochnyh splavov s povyshennym temperaturnym gradientom [Directional solidification of superalloys with a high temperature gradient] //MiTOM. 2002. №7. S. 20–23.
 11. Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. Vlijanie uslovij napravlennoj kristallizacii na strukturu detalej tipa lopatki GTD [Effect of directional solidification conditions on the structure of parts such as blades of GTE] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №7. S. 14–16.
 12. Kablov E.N., Petrushin N.V., Sidorov V.V., Demonis I.M. Razrabotka monokristallicheskih vysokorenievyh zharoprochnyh nikelovyh splavov metodom komp'juternogo konstruirovanija [Development of single-crystal high-rhenium high-temperature nickel alloys by computer-aided design] /V kn.: Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina: nauch.-tehn. sb. M.: Nauka. 2006. S. 79–97.
 13. Echin A.B., Bondarenko Ju.A. Promyshlennaja vysokogradientnaja ustanovka napravlennoj kristallizacii UVNS-6 [Industrial high-gradient directional solidification installation UVNS-6] //Metallurgija mashinostroenija. 2013. №3. S. 32–34.
 14. Echin A.B., Bondarenko Ju.A. Novaja promyshlennaja vysokogradientnaja ustanovka napravlennoj kristallizacii UVNS-6, ee harakteristiki i preimushhestva [The new industrial plant high-gradient directional solidification UVNS-6, its features and benefits] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika. 2014. №2 (materialsnews.ru).
 15. Echin A.B., Bondarenko Ju.A. Novaja promyshlennaja vysokogradientnaja ustanovka UVNS-6 dlja poluchenija lopatok i drugih detalej GTD iz litejnyh zharoprochnyh i intermetallidnyh splavov s monokristallicheskoj strukturoj [The new industrial plant UVNS high-gradient-6 for blades and other GTE parts of the casting heat-resistant and intermetallic alloys with the single-crystal structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014 (v pechaty).
 16. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. i dr. Monokristally nikelovyh zharoprochnyh splavov [Single crystals of nickel superalloys]. M.: Mashinostroenie. 1997. 336 s.
 17. Petrushin N.V., Bronfin M.B., Kablov E.N. i dr. Osobennosti strukturno-fazovyh prevrashhenij pri termicheskoj obrabotke monokristallov vysokorenievyh zharoprochnyh nikelovyh splavov [Features of structural and phase transformations during the heat treatment of single crystals of high-rhenium high-temperature nickel alloys] /V kn.:

Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina: nauch.-tehn. sb. M.: Nauka. 2006. S. 142–154.

18. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B. i dr. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh i intermetallidnyh splavov s monokristallicheskoi strukturoj [The development process of directional solidification of high-temperature gas turbine engine blades and intermetallic alloys with a single-crystal structure] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 20–25.
19. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.