

*Е.Н. Каблов<sup>1</sup>, Ю.А. Бондаренко<sup>1</sup>, А.Б. Ечин<sup>1</sup>, В.А. Сурова<sup>1</sup>*

## **РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛОПАТОК ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ**

*Проанализировано развитие процесса направленной кристаллизации литейных жаропрочных и интерметаллидных сплавов типа ВКНА, а также эвтектических сплавов типа ВКЛС с композиционной структурой для лопаток ГТД.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, интерметаллидные сплавы типа ВКНА, эвтектические сплавы типа ВКЛС с композиционной структурой, монокристаллическая структура, высокоградиентная направленная кристаллизация, жидкометаллический охладитель, лопатки ГТД.

*E.N. Kablov<sup>1</sup>, Yu.A. Bondarenko<sup>1</sup>, A.B. Echin<sup>1</sup>, V.A. Surova<sup>1</sup>*

## **ADVANCEMENT OF THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS OF GTE BLADES OF SUPERALLOYS WITH THE SINGLE-CRYSTAL AND COMPOSITION STRUCTURES**

*The present paper is focused on the analysis of the directional crystallization process advancement of casting superalloys, intermetallic alloys of VKNA type and eutectic alloys of VKLS type with the composition structure used at present for GTE blades.*

**Keywords:** superalloys, intermetallic alloys of VKNA type, eutectic alloys of VKLS type with the composition structure, single-crystal structure, high-gradient directional crystallization, liquid-metal coolant, GTE blades.

---

<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

Развитие авиационного двигателестроения предусматривает совершенствование конструкции газотурбинных двигателей путем повышения температуры газа на входе в турбину, что, в свою очередь, неразрывно связано с разработкой и внедрением новых литейных жаропрочных сплавов для деталей горячего тракта ГТД, а также совершенствованием и созданием новых технологических процессов их изготовления.

В области получения лопаток ГТД из никелевых жаропрочных сплавов в последние годы наблюдалось развитие от технологии литья и направленной кристаллизации – к процессу получения рабочих охлаждаемых лопаток ГТД с монокристаллической структурой (без границ зерен) с заданной кристаллографической ориентацией. Однако даже эта самая современная технология не могла решить всех проблем, связанных с формированием в отливках структуры с крупными выделениями дендритных и фазовых составляющих, со значительной дендритной ликвацией, междендритной пористостью. Поэтому для уменьшения дендритной ликвации в лопатках ГТД с монокристаллической структурой, полученных из современных безуглеродистых сплавов, используют сложную, длительную по времени, связанную с вероятностью оплавления эвтектических фаз, высокотемпературную гомогенизацию с последующими закалкой и старением, что требует специализированного вакуумного оборудования. Обычно после высокотемпературной термической обработки в

междендритном пространстве в местах растворения частиц эвтектической фазы наблюдается появление пор в виде пустот сферической формы размером 10–15 мкм, при этом объемная доля пор увеличивается в ~10 раз.

Для уменьшения пористости в современных высокожаропрочных сплавах применяют достаточно дорогостоящую, энергоемкую, требующую специализированного оборудования технологию газостатического прессования (ГИП) при температурах  $>1000^{\circ}\text{C}$  и давлении  $>100$  МПа.

Для существенного повышения качества структуры, обеспечения ее однородности, уменьшения дендритной ликвации и пористости в ВИАМ был разработан процесс высокоградиентной направленной кристаллизации литейных жаропрочных сплавов [1].

При направленной кристаллизации литейных никелевых жаропрочных сплавов обычно формируется структура, образованная ветвями дендритов, сформировавшимися от центров кристаллизации. Растущие дендриты пронизывают отливку ветвями различных порядков (от первого до третьего), при этом ветви дендритов растут вдоль кристаллографических направлений  $\langle 001 \rangle$ , а наиболее развитые оси первого порядка формируются в направлении максимального температурного градиента на фронте роста.

Особенности формирования структуры жаропрочного сплава в зависимости от условий кристаллизации, температурного градиента на фронте роста помогает объяснить схема фронта кристаллизации в условиях дендритного роста (рис. 1, а, б). При направленной кристаллизации в условиях невысокого температурного градиента на фронте роста (метод Бриджмена, отвод тепла от керамической формы происходит за счет радиационного охлаждения) высота жидко-твердой зоны может достигать десятков миллиметров, при этом формируется крупнодендритная структура (см. рис. 1, в) с развитыми осями второго порядка. Из-за перекрытия дендритных каналов осями второго порядка течение расплава в межосном пространстве затруднено. Вследствие различия молярных объемов жидкой и твердой фаз в основании дендритов вблизи кристаллизующейся эвтектической  $\gamma/\gamma'$ -фазы могут формироваться междендритные поры. Механизм их образования во многом связан с усадкой – меньшим объемом твердых фаз по сравнению с расплавом.

Повышение температурного градиента методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем обеспечивает уменьшение высоты жидко-твердой зоны, повышение скорости охлаждения, что делает структуру более тонкодендритной; это обеспечивает подпитку оснований дендритов, содействует уменьшению размера и количества пор. Повышение градиента также увеличивает скорость охлаждения, что содействует формированию более однородной тонкодендритной структуры (см. рис. 1, г) с меньшими по размеру выделениями частиц  $\gamma/\gamma'$ -эвтектики и, соответственно, меньшей пористостью.

На примере структуры сплава ВЖМ1 показано, что повышение температурного градиента  $G$  с 60 до  $200^{\circ}\text{C}/\text{см}$  при одинаковой скорости кристаллизации  $R=5$  мм/мин обеспечивает формирование тонкодендритной структуры с междендритным расстоянием  $\lambda \approx 160$  мкм (вместо  $\lambda \approx 350$  мкм).

В результате исследования (микрорентгеноспектрального анализа) зависимости коэффициента ликвации жаропрочных сплавов CMSX-4, Rene 5, ВЖМ1 от условий направленной кристаллизации установлено, что повышение температурного градиента на фронте кристаллизации способствует уменьшению дендритной ликвации. Это особенно важно для современных ренийсодержащих сплавов, так как рений имеет малую диффузионную подвижность в твердом никелевом растворе, и даже длительная высокотемпературная гомогенизация не устраняет ликвацию рения внутри дендритных ячеек. Это может служить благоприятной средой для образования выделений ТПУ фаз при эксплуатации и высокотемпературном отжиге [2].

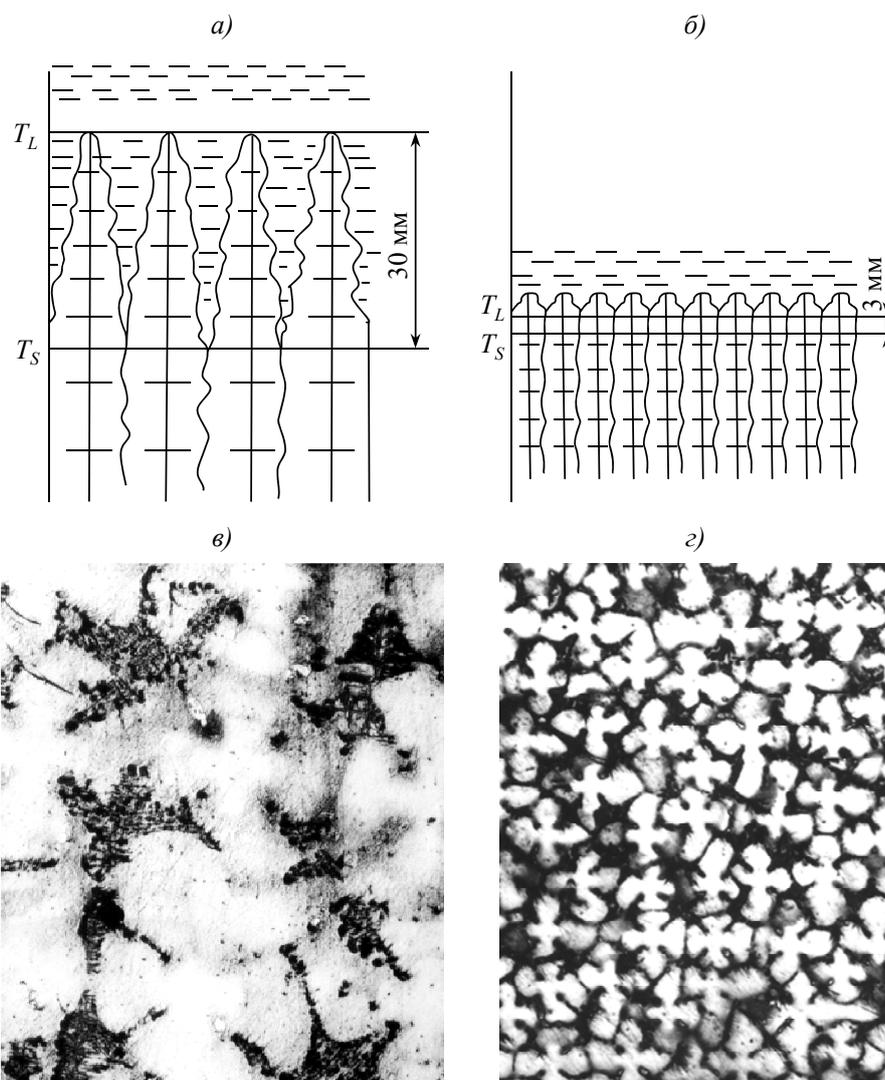


Рис. 1. Схема фронта кристаллизации в условиях дендритного роста при направленной кристаллизации и микроструктура ( $\times 100$ ) сплава ЖС26, полученного при температурном градиенте  $G$ : 20 (а, в) и 200°С/см (б, з)

На монокристаллических образцах  $\langle 001 \rangle$  сплава ВЖМ1, полученных методом высокоградиентной направленной кристаллизации, без длительной высокотемпературной гомогенизации (с кратковременной термообработкой для снятия термических напряжений – отжиг 1 ч) было проведено определение длительной прочности (при 900, 1000, 1100°С) и усталости (МнЦУ при 900°С). Результаты испытаний свидетельствуют, что уровень полученных свойств лежит в пределах паспортных характеристик сплава [3]. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что высокоградиентная технология, разработанная в ВИАМ, делает возможным получение однородной, тонкодендритной структуры, с меньшей дендритной ликвацией и пористостью, т. е. обеспечивает получение высокого уровня свойств жаропрочных сплавов, а также делает технологию получения лопаток ГТД более простой и экономичной.

Эти результаты нашли свое подтверждение и при получении рабочих лопаток ГТД с монокристаллической структурой. Оценка микроструктуры показала, что в рабочих лопатках ГТД, отлитых по высокоградиентной технологии ( $R_{кр}=5$  мм/мин), отсут-

ствуют дефекты структуры типа *freckles*, формируется однородная, тонкодендритная структура как в тонком сечении пера лопатки ( $\lambda=160-180$  мкм), так и в более толстом замке ( $\lambda=180-200$  мкм) (рис. 2).

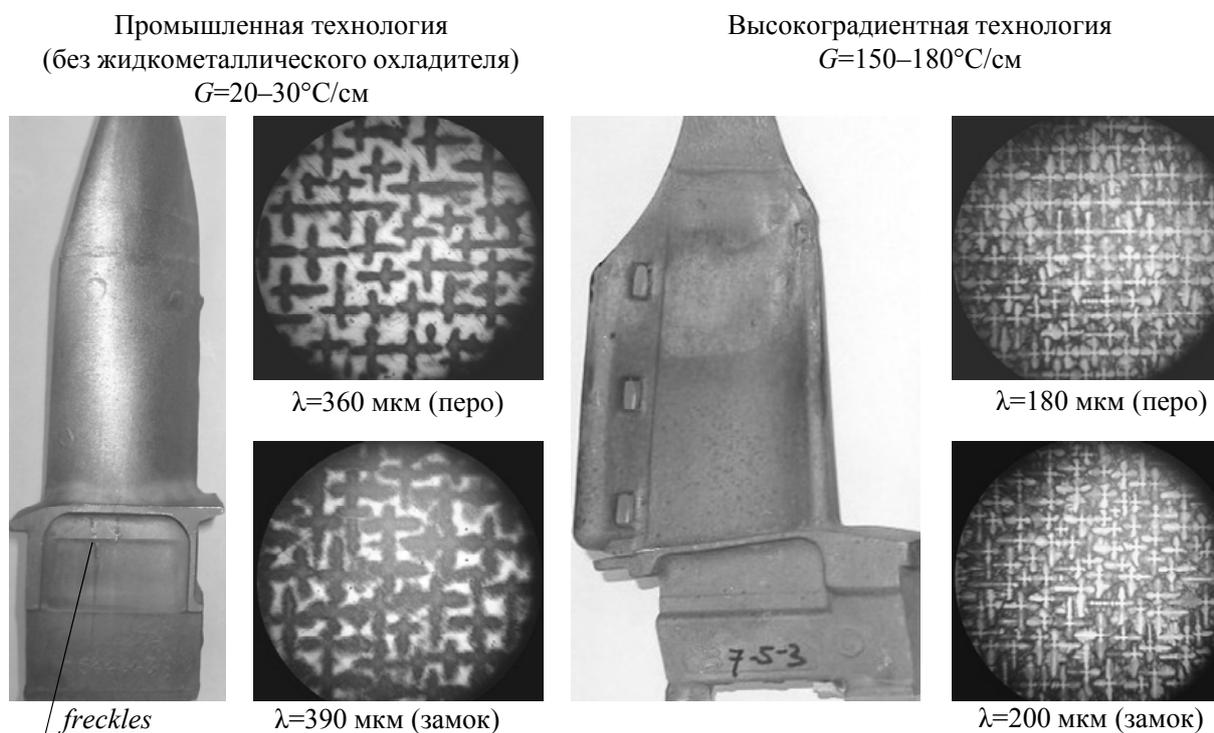


Рис. 2. Макро- и микроструктура ( $\times 100$ ) рабочих лопаток ГТД, полученных с помощью промышленной и высокоградиентной технологий

Высокоградиентная технология также обеспечивает повышение качества структуры и высокий уровень свойств в интерметаллидных жаропрочных сплавах типа ВКНА (на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) с монокристаллической структурой [4]. Микроструктура подобных сплавов имеет дендритно-ячеистое строение, двухфазные ( $\gamma+\gamma'$ ) оси дендритов ориентированы в направлении роста, в межфазных участках наблюдаются выделения  $\gamma'$ -фазы. Высокоградиентная направленная кристаллизация уменьшает размер между осями дендритов, размер выделений в виде «сетки»  $\gamma+\gamma'$  внутри осей дендритов, размер выделений  $\gamma'$ -фазы в межосных участках, размер пор. Разработаны основные параметры технологии и получены опытные партии деталей горячего тракта ГТД: сопловые лопатки различных конструкций, «сегменты» жаровых труб с монокристаллической структурой для горячих испытаний (рис. 3).

Для осуществления процесса высокоградиентной направленной кристаллизации в ВИАМ были спроектированы и изготовлены специализированные установки: модульная – УВНЭС-4 и опытно-промышленная – УВНС-5 с системой управления основными параметрами процесса направленной кристаллизации при помощи компьютера. Их главной конструктивной особенностью является печь подогрева форм с двухзонным нагревателем, ванна с жидкометаллическим охладителем – расплавом олова и эффективные тепловые экраны, отделяющие зоны нагрева и охлаждения [5].

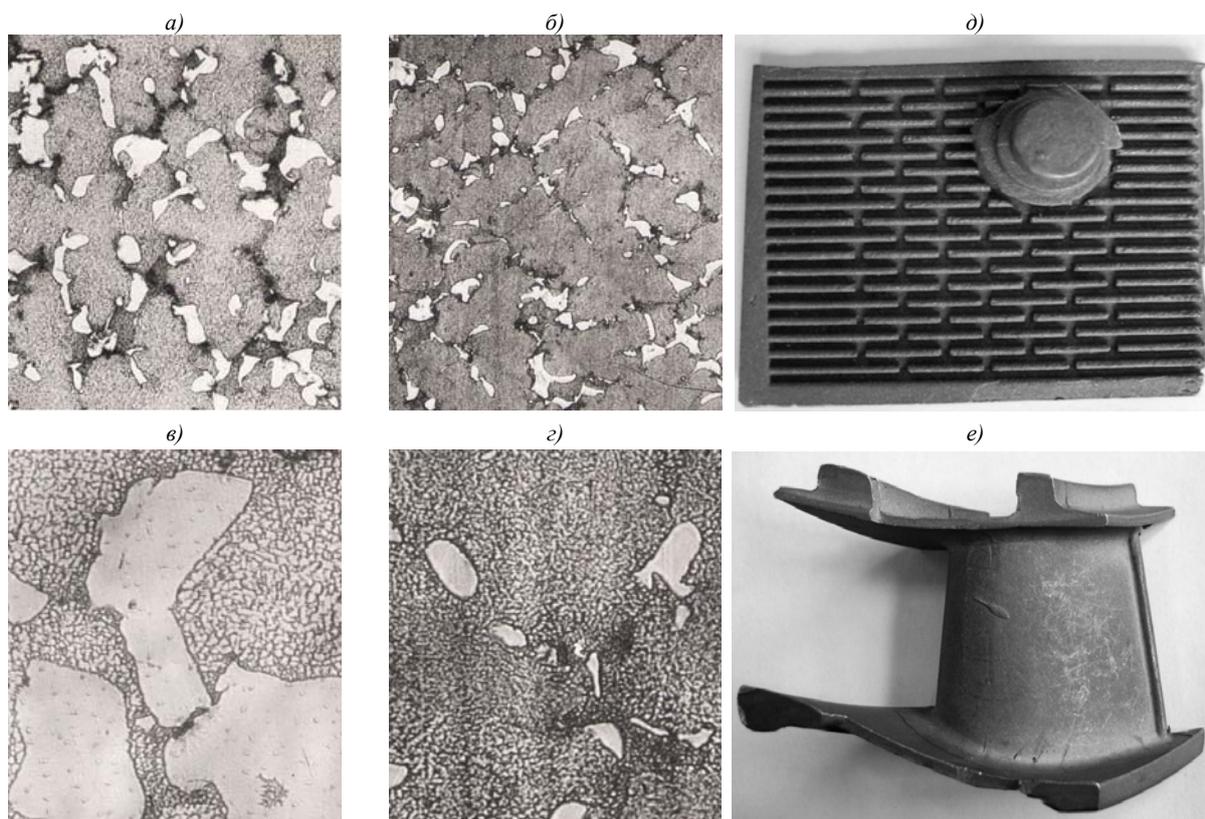


Рис. 3. Микроструктура (*a*, *б*, *г* –  $\times 100$ ; *в* –  $\times 500$ ) интерметаллидного сплава типа ВКНА, полученного при температурных градиентах  $G$  на фронте кристаллизации 30 (*a*, *в*) и 200°C/см (*б*, *г*), и отливки, полученные в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации – деталь типа «сегмент» (*д*) и сопловая лопатка ГТД (*е*)

Проведенные исследования позволили установить основные факторы, обеспечивающие повышение температурного градиента на фронте кристаллизации: повышение температуры на форме перед фронтом кристаллизации; применение эффективных тепловых экранов, отделяющих зоны нагрева и охлаждения; использование легкоплавких жидкометаллических охладителей; уменьшение расстояния между нагревателями и жидкометаллическим охладителем; повышение теплопроводности керамических форм.

Еще одно направление эффективного использования процесса высокоградиентной направленной кристаллизации – это получение эвтектических жаропрочных сплавов с композиционной структурой. В этих сплавах высокая прочность обеспечивается путем реализации как дисперсионного упрочнения жаропрочной матрицы частицами  $\gamma'$ -фазы, так и композиционного – благодаря армированию жаропрочной матрицы волокнами (например, монокарбида ниобия). В ВИАМ были разработаны сплавы подобного типа (ВКЛС-10, ВКЛС-20, ВКЛС-20Р) и изучены особенности формирования структуры в них.

Экспериментально для сплавов типа ВКЛС была определена величина критерия устойчивости плоского фронта роста, обеспечивающего формирование композиционной структуры:  $G_l/R_{кр} \approx 150^\circ\text{C}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$ . При более низких значениях формируется дендритно-композиционная и дендритная структура с пониженным уровнем свойств.

Отливки образцов и опытных лопаток с композиционной структурой получали на установке УВНЭС-3 с жидкометаллическим охладителем (расплавом олова) при температурных градиентах на фронте роста  $G \geq 120^\circ\text{C}/\text{см}$  и скорости кристаллизации

$R_{кр}=6-8$  мм/ч. В ВИАМ была разработана опытная технология и получены опытные партии охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток из эвтектических сплавов типа ВКЛС [6], на которых были проведены горячие испытания в составе опытных двигателей, получены положительные результаты.

Высокоградиентная технология литья лопаток и других деталей горячего тракта ГТД из литейных высокожаропрочных, интерметаллидных (типа ВКНА) сплавов с монокристаллической структурой, а также эвтектических сплавов с композиционной структурой открывает новые возможности в создании газотурбинных двигателей следующих поколений, в повышении их мощности, ресурса и топливной эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А. Получение монокристаллических лопаток ГТД высокоградиентной направленной кристаллизацией //Авиационная промышленность. 2000. №1. С. 53–56.
2. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–38; №5. С. 14–17.
3. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Сулова В.А., Ечин А.Б. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и свойства ренийсодержащего монокристаллического сплава //МИТОМ. 2006. №8. С. 33–35.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А. Высокоградиентная направленная кристаллизация жаропрочных сплавов типа ВКНА /В сб.: «Юбилейный научно-технический семинар». М.: МАТИ–РГГУ. 2000. С. 71–81.
5. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Высокоградиентная направленная кристаллизация лопаток ГТД с монокристаллической структурой //Газотурбинные технологии. 2007. №3(54). С. 26–30.
6. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Особенности получения рабочих лопаток малогабаритных ГТД из сплава ВКЛС-20 //Авиационная промышленность. 1993. №2. С. 9–10.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A. Poluchenie monokristallicheskih lopatok gtd vysokogradientnoj napravlennoj kristallizaciej [Preparation of single crystal blades GTE high-gradient directional crystallization] //Авиационная промышленность. 2000. №1. С. 53–56.
2. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure] //Materialovedenie. 1997. №4. С. 32–38; №5. С. 14–17.
3. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N., Surova V.A., Echin A.B. Vlijanie vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii na strukturu i svojstva renijsoderzhashhego monokristallicheskogo splava [Influence of high-gradient directional crystallization on the structure and properties of monocrystalline rhenium alloy] //MiTOM. 2006. №8. С. 33–35.
4. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A. Vysokogradientnaja napravlennaja kristallizacija zharoprochnyh splavov tipa VKNA [High-gradient directional solidification of superalloys type VKNA] /V Sb.: «Jubilejnyj nauchno-tehnicheskij seminar». М.: МАТИ–РГГУ. 2000. С. 71–81.
5. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N., Demonis I.M. Vysokogradientnaja napravlennaja kristallizacija lopatok GTD s monokristallicheskoj strukturoj [High-gradient directional solidification GTE blades with single-crystal structure] //Gazoturbinnye tehnologii. 2007. №3(54). С. 26–30.
6. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Osobennosti poluchenija rabochih lopatok malogabaritnyh GTD iz splava VKLS-20 [Peculiarities of manufacturing of the working blades for small GTE of alloy VKLS-20] //Авиационная промышленность. 1993. №2. С. 9–10.