



УДК 66.065.5

**РОЛЬ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Е.Н. Каблов

*доктор технических наук, академик РАН*

В.В. Герасимов

*кандидат технических наук*

Е.М. Висик

*кандидат технических наук*

И.М. Демонис

*кандидат технических наук*

**Март 2013**

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.

Первая публикация статьи - в журнале «Авиационные материалы и технологии», №1, 2008 г.

Данная редакция (дополненная, переработанная) подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ», №3, 2013 г.

УДК 66.065.5

*Е.Н. Каблов, В.В. Герасимов, Е.М. Висик, И.М. Демонис*

## **РОЛЬ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ГТД**

*Показана роль направленной кристаллизации жаропрочных сплавов как эффективного процесса в ресурсосберегающей технологии при производстве малогабаритных дисков турбин; внедрении в производство интерметаллидных сплавов типа ВКНА с монокристаллической структурой; освоении высокорениевых жаропрочных сплавов при литье монокристаллических лопаток турбин.*

**Ключевые слова:** *заготовки под диски, интерметаллидные сплавы, высокорениевые сплавы, направленная кристаллизация жаропрочных сплавов.*

*E.N. Kablov, V. V. Gerasimov, E.M. Visik, I.M. Demonis*

## **Role of the directed solidification in the resource-saving production technologies of details of GTD**

*The role of the directed of solidification heat resisting alloys as effective process in resource-saving technology is shown by production of small-sized disks of turbines; introduction in production of intermetallic alloys like VKNA with single-crystal structure; development of high-rhenium heat resisting alloys when molding single-crystal shovels of turbines.*

**Key words:** *preparations under disks, intermetallic alloys, the high-rhenium alloys, the directed solidification of heat resisting alloys.*

Направленная кристаллизация благодаря устранению границ зерен в деталях ГТД обеспечила повышение их эксплуатационных характеристик и стала одним из основных способов производства лопаток авиационных двигателей. В настоящее время монокристаллические лопатки из жаропрочных сплавов широко применяются в двигателях РД-33, АЛ-41, Д18, Д-436, ПС-90А, ТВ-7-117, ТВД-20 и др.

Дальнейшее развитие двигателестроения требует разработки ресурсосберегающих технологий производства деталей ГТД и ГТУ. При этом роль направленной кристаллизации в развитии ресурсосберегающих технологий будет неизменно возрастать [1–3, 5]. Так, в технологии производства малогабаритных дисков турбин применение направленной кристаллизации вместо ВДП позволяет повысить КИМ, снизить трудоемкость и энергопотребление благодаря получению заготовок более высокого металлургического качества, с существенно меньшими размерами зоны прибыли, с меньшей пористостью. Работы по созданию технологии производства малогабаритных дисков с использованием процесса направленной кристаллизации при получении дисковых заготовок ведутся в ВИАМ в течение последних четырех лет. За это время были решены вопросы закрепления керамических относительно тонких (состоящих из 8–10 слоев керамической суспензии) форм внутри печи подогрева установки типа УВНК. Увеличена емкость плавильного тигля до 28 кг. Определены основные технологические параметры процесса направленной кристаллизации крупногабаритных отливок (диаметр 110 мм, высота 300–320 мм, масса до 26 кг) – сначала расчетным путем по программе, созданной совместно с МАТИ им. К.Э. Циолковского для кристаллизации лопаток, а затем уточненные экспериментально. Проведено термометрирование при кристаллизации заготовок  $\varnothing 100$  мм, с помощью которого уточнены значения градиентов температуры на фронте кристаллизации в нижней и верхней частях отливки. Исследована макро- и микроструктура отливок по высоте и сечениям в местах расположения термопар.

На рис. 1 представлены два варианта подвесок для форм, в которых получают дисковые заготовки с монокристаллической и направленной структурами. Конструкция подвески воспринимает нагрузку от формы, залитого в нее расплава и предохраняет форму от деформации при высокой температуре.

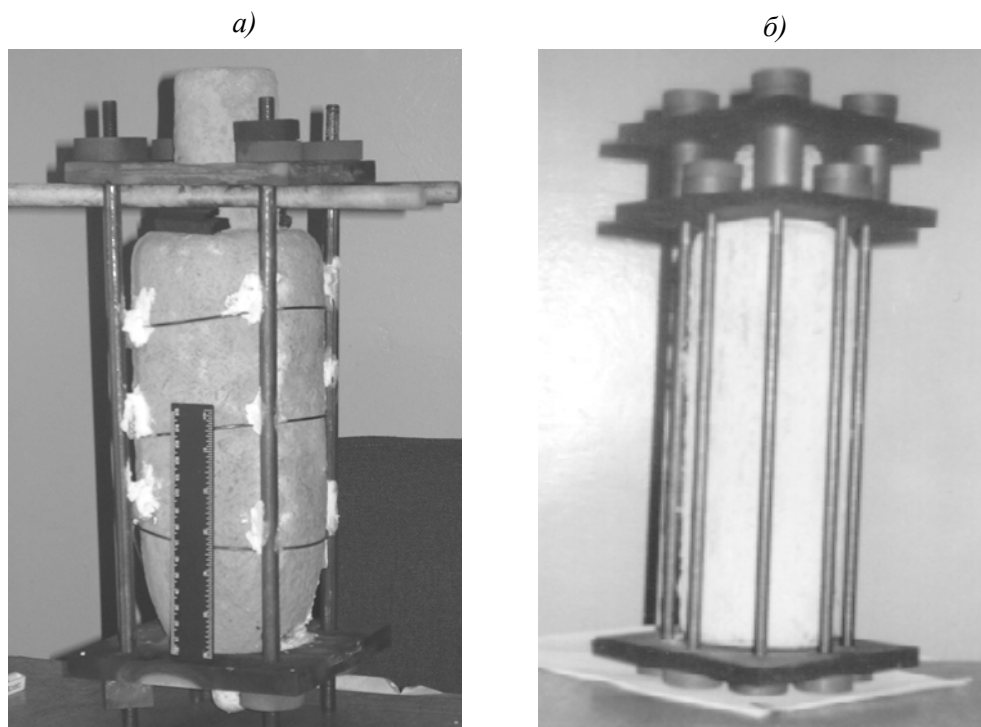


Рис. 1. Два варианта подвесок с керамическими формами для получения отливок  $\varnothing 100$  мм под дисковые заготовки с монокристаллической (а) и направленной структурой (б)

На рис. 2 показан ход температурных кривых при термометрировании процесса направленной кристаллизации дисковой заготовки из сплава ЭП975. Справа от графиков представлена схема расположения термопар и расстояния между ними. Термопары 2–4 расположены вдоль вертикальной оси заготовки в алундовом колпаке, закрепленном в горловине формы. Термопара 1 закреплена на наружной поверхности формы на высоте осевой термопары 3. Кроме термопар 1–4 на рис. 2 изображены также температурные кривые стационарных термопар верхнего (ППФ(В)) и нижнего нагревателей (ППФ(Н)), термопары погружения (ТП) и показания оптического пирометра (ТЕРА) для измерения температуры расплава. Используются термопары класса ВР5/ВР20, диаметр электродов 0,35 мм, градуировка 2.

Результаты термометрирования показывают, что при установившемся режиме нагрева форм показания всех термопар стабильны и находятся в диапазоне температур верхнего и нижнего нагревателей. Оптический пирометр и термопара погружения показывают «нулевые» отметки. После расплавления металла в индукторе и замера его температуры расплав заливается в нагретую керамическую форму. Термопары на форме в этот момент резко меняют свои показания, так как температура расплава превышает температуру нагрева формы. Максимальное изменение температуры зафиксировано термопарой 1, минимальное – 4. В процессе перемещения формы с

расплавом из зоны нагрева в зону охлаждения термопары фиксируют плавное снижение температуры с почти горизонтальной площадкой при 1300–1320°C (выделение теплоты кристаллизации на фронте роста). Проведенное термометрирование позволило оценить фактические значения градиентов температур на фронте кристаллизации сплава ЭП975. Установлено, что градиент изменяется от 40°C/см в нижней части отливки до 24°C/см у верхней термопары. Невысокие значения градиентов температуры на фронте кристаллизации на отливках большого диаметра являются следствием масштабного фактора. Известно, что с увеличением приведенного размера отливки  $X$  (отношение площади поперечного сечения отливки к ее периметру) величина градиента уменьшается, при этом эффективность жидкометаллического охлаждения снижается. На рис. 3 графически представлена зависимость осевого градиента температур от приведенного размера отливки  $X$ , полученная расчетным путем. Для дисковых заготовок  $\varnothing 100$ –110 мм величина  $X$  равна 20–27 мм, что и определяет снижение градиента температур на фронте роста до указанных выше значений.

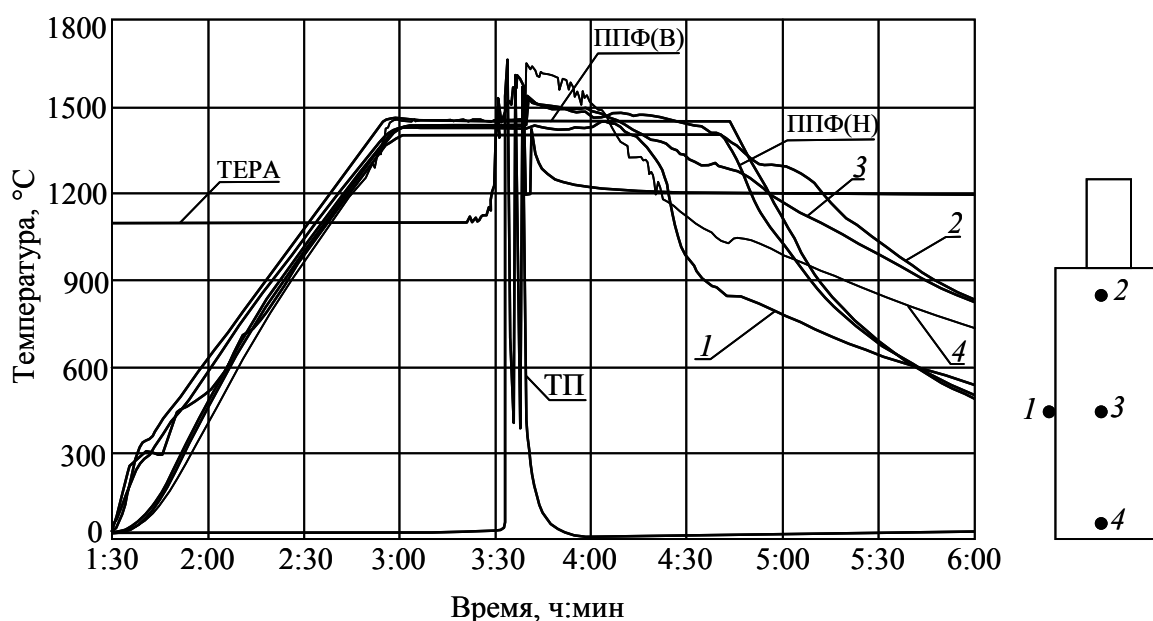


Рис. 2. Термограмма плавки дисковой заготовки из сплава ЭП975 на установке УВНК-14 и схема расположения термопар в керамической форме:

ППФ(В) и ППФ(Н) – показание термопар на нагревателях печи подогрева формы: верх и низ соответственно; ТП – показание температуры расплава в тигле термопарой погружения; ТЕРА – показания температуры расплава в тигле оптическим прибором; схема расположения и показания термопар: 1 – на форме; 2, 3, 4 – внутри формы (отливки)

В результате проведенной работы были определены основные технологические параметры кристаллизации дисковых заготовок большого диаметра из сплава ЭП975: для верхнего нагревателя  $T_{\text{вн}}=1450^{\circ}\text{C}$ , для нижнего нагревателя  $T_{\text{нн}}=1400^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{\text{кр}}=5$  мм/мин,  $T_{\text{распл}}=1600\text{--}1620^{\circ}\text{C}$ . По этому режиму были изготовлены дисковые заготовки, из которых последующей термомеханической обработкой получены реальные диски диаметром 200–220 мм, структура и свойства которых удовлетворяют требованиям ТУ. На рис. 4 показаны литая дисковая заготовка и характерная микроструктура в продольном и поперечном к оси слитка направлениях в литом состоянии.

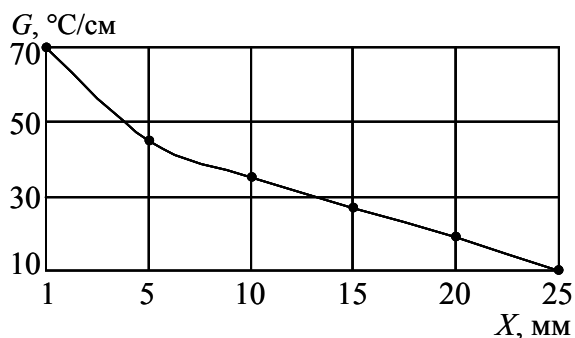


Рис. 3. Изменение осевого градиента температур  $G$  в зависимости от приведенного размера отливки  $X$

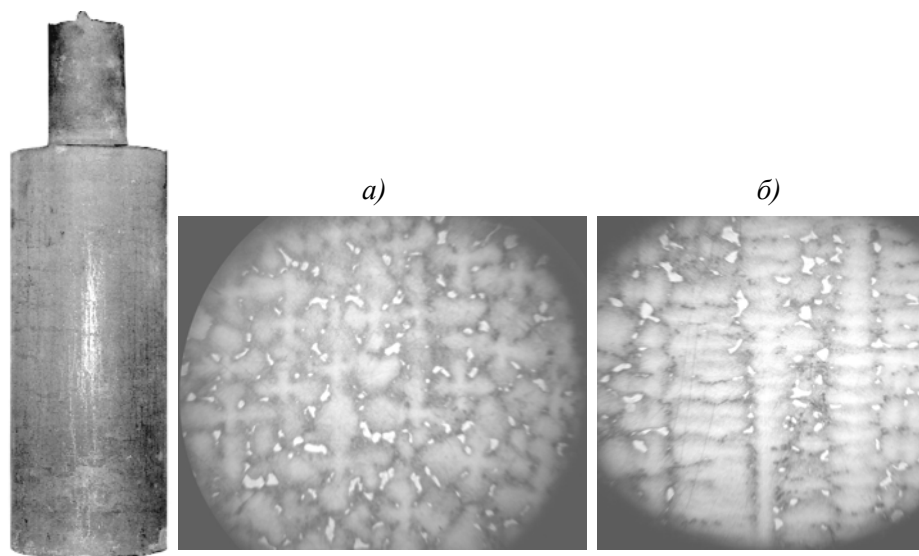


Рис. 4. Литая заготовка для получения диска из деформируемого сплава ЭП975 с направленной структурой и характерная микроструктура ( $\times 100$ ) сплава в поперечном (а) и продольном направлении (б)

Одним из перспективных классов конструкционных материалов, эксплуатационные свойства которых определяются технологией направленной кристаллизации, являются интерметаллидные сплавы типа ВКНА [4,6]. Они существенно дешевле

многокомпонентных жаропрочных сплавов, содержат значительно меньшие количества остродефицитных легирующих элементов, имеют меньшую плотность, не требуют сложной многоступенчатой термообработки.

В ВИАМ разработаны технологические процессы направленной кристаллизации неохлаждаемых рабочих лопаток из сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой кристаллографической ориентации [111] для малогабаритных двигателей. Лопатки успешно прошли испытания на ОМКБ им. Баранова. Разработан и паспортизован новый сплав этого класса – ВКНА-25. Проведено технологическое опробование этого сплава при литье монокристаллических неохлаждаемых рабочих и охлаждаемых сопловых лопаток. Причем сопловые лопатки первой ступени двигателя РД-33 получены в виде монокристаллических секторов по 3 лопатки в секторе, лопатки второй ступени того же двигателя – в виде отдельных деталей со своими стартовыми полостями, обеспечивающими монокристаллическую структуру. На рис. 5 представлены внешний вид двухъярусного блока лопаток малогабаритного двигателя и микроструктура сплава ВКНА-25 в монокристаллических лопатках ориентации [001] и [111].

Микроструктура сплава ВКНА-25 представляет собой  $\gamma'$ -матрицу с прослойками  $\gamma$ -фазы и небольшим количеством эвтектики  $\gamma'+\beta$ , расположенной в междендритном пространстве. Расстояние между осями дендритов I порядка в рабочих лопатках малогабаритного двигателя  $\lambda_1=200-220$  мкм (КГО [001]) и 230–250 мкм для КГО [111]. В сечении пера сопловых охлаждаемых лопаток  $\lambda_1$  изменяется в пределах 220–280 мкм. При исследовании микроструктуры с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840\* в сплаве ВКНА-25 отмечена значительная разноразмерность  $\gamma'$ -фазы в осях и межосных пространствах, что характерно для сплава в литом состоянии. Размер  $\gamma'$ -фазы в осях 0,35–0,5 мкм, в межосных участках: 0,5–1,0 мкм.

На рис. 6 показаны сектор сопловых лопаток первой ступени и отдельные лопатки второй ступени двигателя РД-33.

На установке УВНК-14 разработана опытная технология литья таких протяженных изделий, как створки реактивного сопла с управляемым вектором тяги для двигателя АЛ-31 и отливки пластин для фильер (рис. 7), с помощью которых получают керамические волокнистые материалы. Важно отметить, что работы по интерметаллидным сплавам легко вписываются в существующий на заводах технологический процесс производства монокристаллических лопаток из жаропрочных многокомпонентных сплавов, включая изготовление керамических стержней и оболочковых форм.

\*Исследования выполнены с участием О.Б. Тимофеевой.

Высокорениевые сплавы типа ВЖМ1, ВЖМ4 – самые жаропрочные в настоящее время ( $\sigma_{100}^{1000} = 300\text{--}320$  МПа) – еще не нашли широкого применения из-за высокой стоимости, большого содержания остродефицитных легирующих элементов в их составе, сложной многоступенчатой термообработки. Однако в двигателях нового поколения сплавы этого класса будут непременно востребованы. Поэтому задача снижения стоимости лопаток из этих сплавов является особенно актуальной при промышленном их производстве. Роль направленной кристаллизации в данном случае сводится к поиску оптимальных значений градиента и скорости перемещения формы из зоны нагрева в зону охлаждения, которые бы обеспечили получение качественных монокристаллических лопаток за минимально возможное время работы литейного оборудования. Работы, проведенные в ВИАМ, по кристаллизации высокорениевых сплавов показали, что при оптимальных значениях градиента температур ( $70\text{--}90^\circ\text{C}/\text{см}$ ) и скорости кристаллизации ( $7\text{--}10$  мм/мин) получают совершенные монокристаллические отливки лопаток в количестве 12 шт. за один цикл при выходе годного  $85\text{--}90\%$ . Такая производительность удовлетворяет потребности промышленного производства. На рис. 8 представлены результаты определения КГО (кристаллографической ориентации) цилиндрической заготовки из сплава ВЖМ4 в нижней и верхней ее части, которые подтверждают совершенство монокристаллической структуры снизу доверху отливок, полученных на установке УВНК-9А.

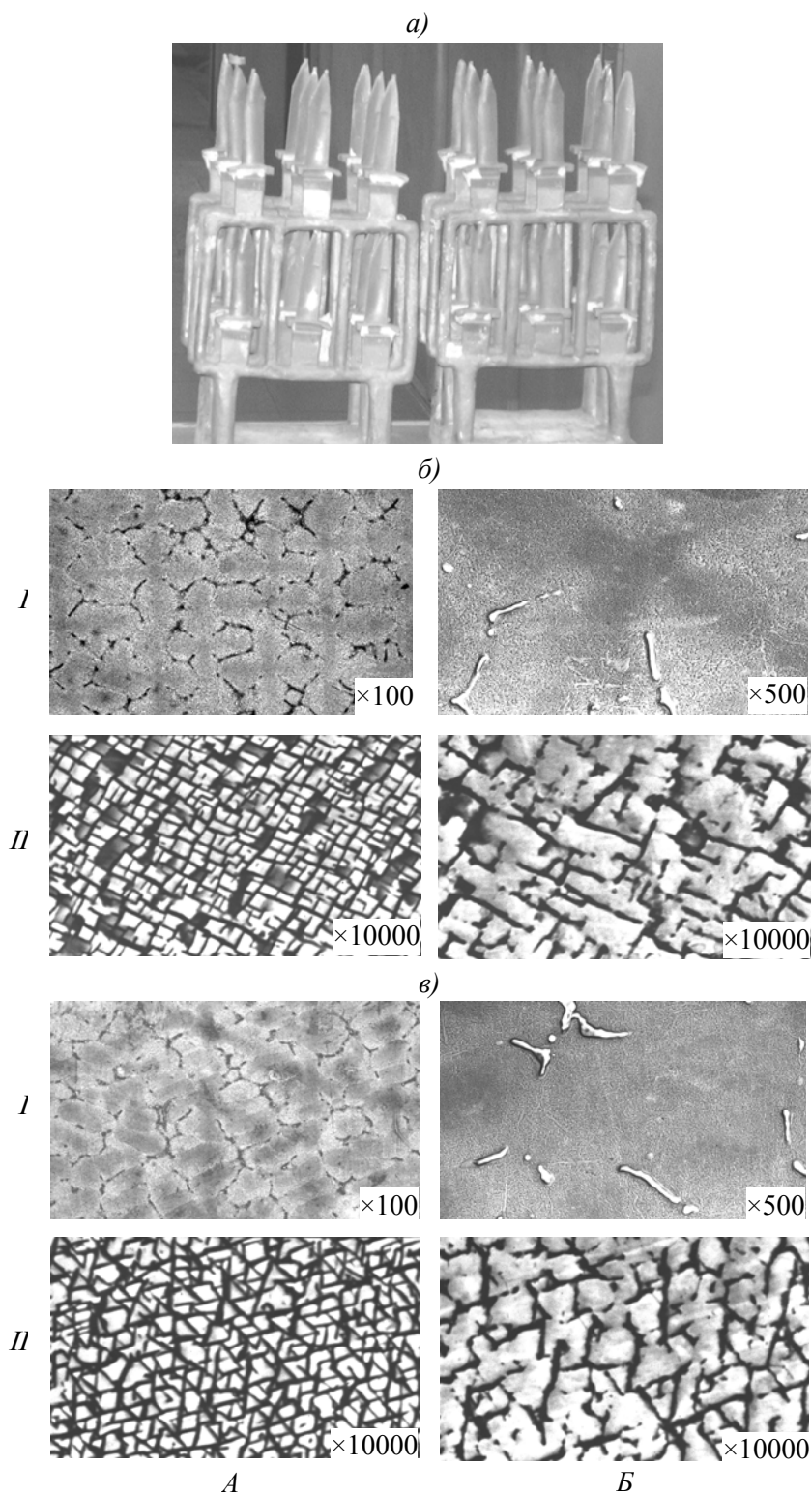


Рис. 5. Двухъярусный блок рабочих лопаток (*a*) малогабаритного двигателя и микро-структура интерметаллидного сплава ВКНА-25 в монокристаллических лопатках ориентации  $[001]$  (*б*) и  $[111]$  (*в*):

*I* – дендритная структура сплава; *II* – морфология  $\gamma'$ -фазы – в осях (*A*) и межосных пространствах дендритов (*B*)

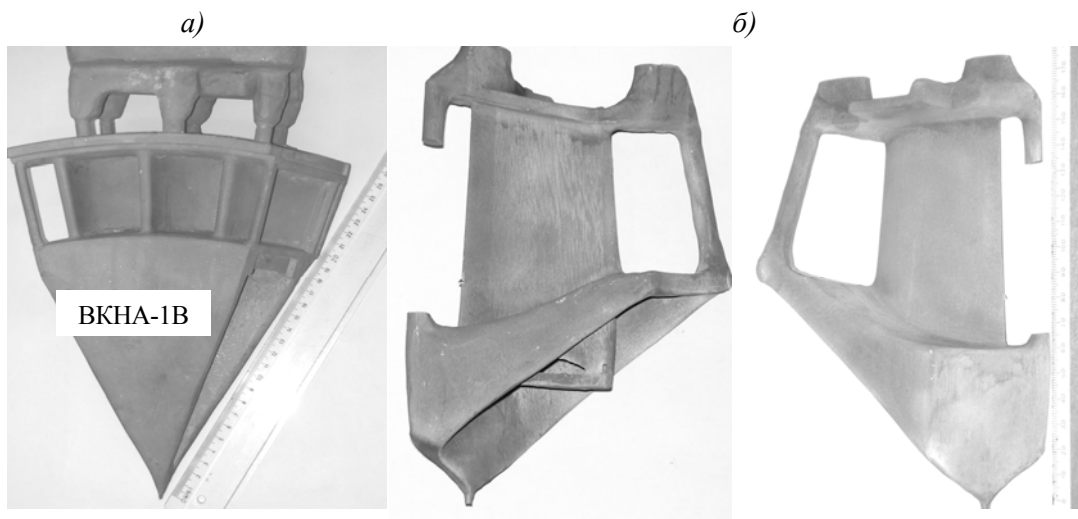


Рис. 6. Сектор сопловых лопаток 1 ступени (а) и отдельные лопатки 2 ступени (б) из интерметаллидного сплава ВКНА-1В для двигателя РД-33

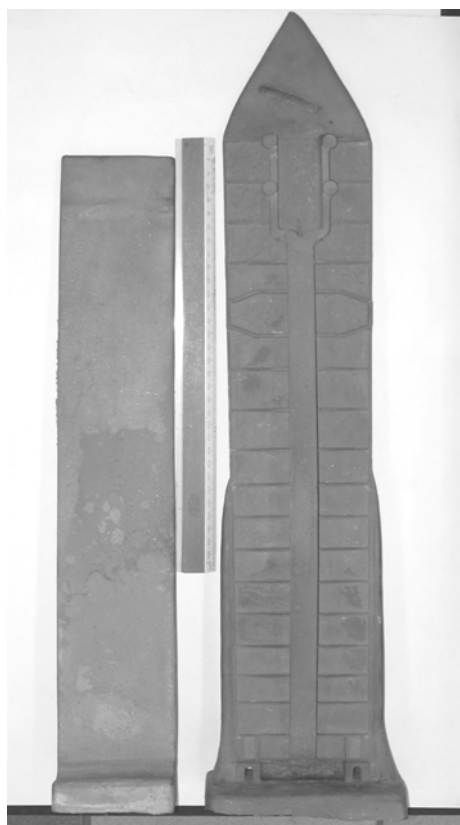


Рис. 7. Заготовка пластины для фильер с направленной структурой и створка реактивного сопла с управляемым вектором тяги из интерметаллидного сплава ВКНА-1В с монокристаллической структурой

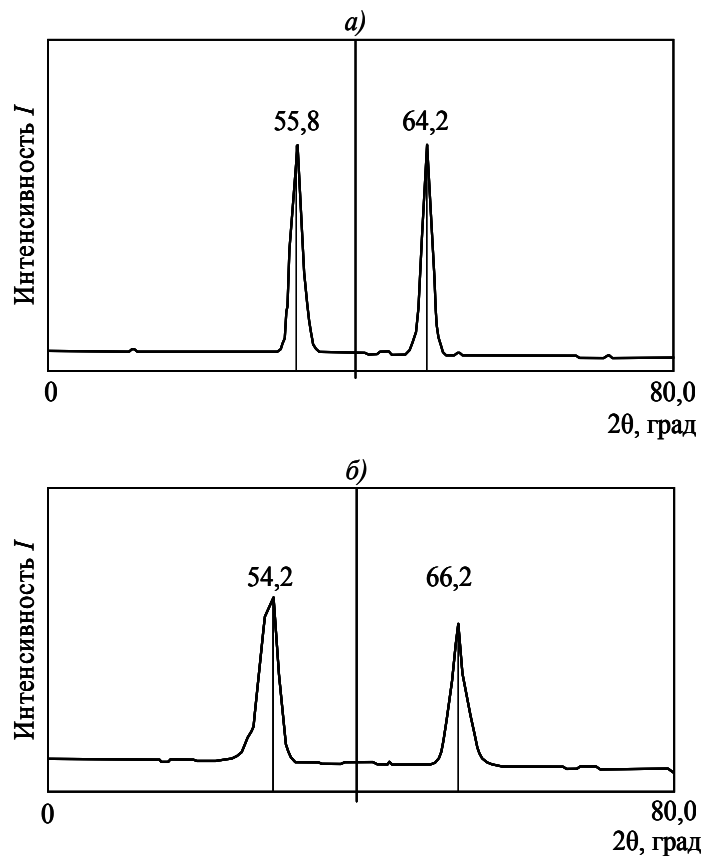


Рис. 8. Результаты определения отклонения от направления [001] кристаллографической ориентации цилиндрической заготовки из высокорениевого сплава ВЖМ4 в нижней (а; отклонение по пикам  $\alpha=4,2$ ) и верхней ее части (б;  $\alpha=6,0$ )

На рис. 9 показана характерная микроструктура в нижнем и верхнем сечениях рабочей лопатки из сплава ВЖМ1-ВИ. Междендритное расстояние между осями I порядка  $\lambda$  изменяется от 200–210 мкм (в нижней части лопатки) до 250–260 мкм (в верхнем сечении).

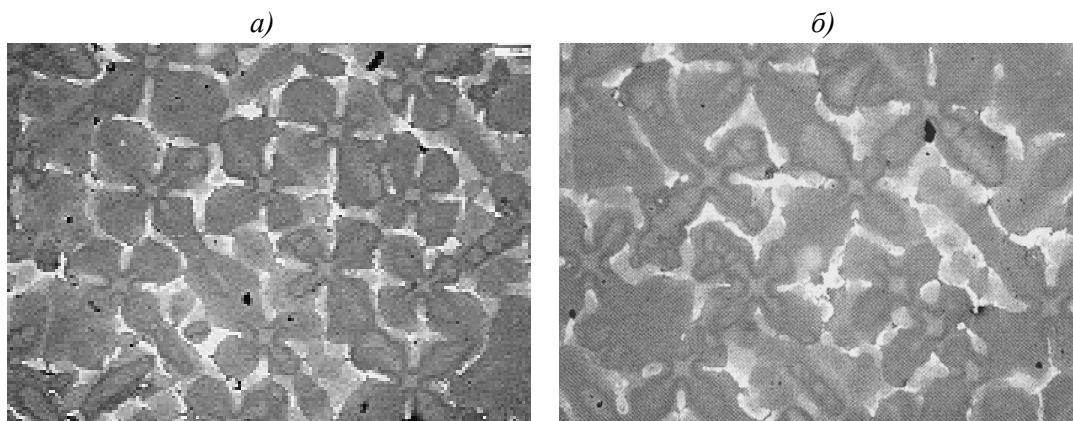


Рис. 9. Микроструктура ( $\times 100$ ) сплава ВЖМ1-ВИ в нижнем (*a*) и верхнем сечении (*б*) рабочей лопатки в литом состоянии

Данные отливки получены при градиенте  $80^{\circ}\text{C}/\text{см}$  и скорости кристаллизации 7–8 мм/мин. Таким образом, оптимизация параметров направленной кристаллизации важна и для совершенства структуры монокристаллических лопаток, и для экономических показателей их производства, особенно в промышленном масштабе.

Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД из жаропрочных сплавов состоит:

- при производстве малогабаритных дисков турбин – в повышении КИМ, снижении трудовых и энергетических затрат;
- в широком внедрении в производство интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой, не содержащих больших количеств остродефицитных легирующих элементов и обладающих меньшей плотностью и большей удельной прочностью;
- при освоении высокорениевых жаропрочных сплавов при литье монокристаллических лопаток турбин эффективность процесса будет определяться поиском оптимальных скоростей охлаждения заготовок, в частности повышением скорости направленной кристаллизации до 7–10 мм/мин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 7–17.
2. Esser W. Direction Solidification of Blades for Industrial Gas Turbines //Materials for Advanced Power Engineering. 1994. p. 641–659.
3. Seth Brij B. Superalloys – the Utility Gas Turbine Perspective //Superalloys, 2000, p. 3–16.
4. Betz U., Seserko P. и др. Экономические преимущества процесса ЛМС для производства турбинных лопаток: Доклад на 4-м симпозиуме ALD Sanya Hainan-Island. China, 7–8.11.2005.
5. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий /В сб.: «Авиационные материалы и технологии»: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 19–36.
6. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Герасимов В.В., Тимофеева О.Б. Жаропрочные сплавы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  //Труды международной науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ. 2006. С. 71–75.
7. Герасимов В.В., Висик Е.М., Никитин В.А., Зернова М.Г. Опыт освоения технологии ли-тъя секторов сопловых лопаток с монокристаллической структурой из сплава ВКНА-4У //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 13–18.
8. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы /В сб.: «Авиационные материалы и технологии»: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 57–60.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 36–52.
10. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мозалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей /В сб.:

Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 52–57.

11. Герасимов В.В., Висик Е.М., Бакерин С.В. Изготовление протяженных литых заготовок из сплава ВКНА-1В направленной кристаллизацией //Литейное производство. 2011. №10. С. 35–38.б