

*В.В. Герасимов<sup>1</sup>, Е.М. Висик<sup>1</sup>, В.А. Никитин<sup>2</sup>, М.Г. Зернова<sup>2</sup>*

## **ОПЫТ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ СЕКТОРОВ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ СПЛАВА ВКНА-4У**

*Получение рабочих лопаток ГТД с монокристаллической структурой в настоящее время освоено рядом двигателестроительных заводов авиационной промышленности.*

*В статье впервые освещается опыт освоения технологии литья секторов сопловых лопаток с монокристаллической структурой из интерметаллидного сплава ВКНА-4У, отливки которых конструктивно являются более сложными, чем отдельно отлитые лопатки ГТД. Приведены схема модельного блока сектора из трех лопаток с элементами литниково-питающей системы, технические характеристики установки УВНК-14 для получения монокристаллических отливок высотой до 600 мм, основные температурные параметры процесса получения секторов на установке УВНК-14, дан анализ дефектов структуры в полученных отливках.*

**Ключевые слова:** монокристаллические отливки, интерметаллидные сплавы, детали горячего тракта двигателя, установки для направленной кристаллизации.

*V.V. Gerassimov<sup>1</sup>, E.M. Visyk<sup>1</sup>, V.A. Nikitin<sup>2</sup>, M.G. Zernova<sup>2</sup>*

## **MASTERING EXPERIENCE IN CASTING TECHNOLOGY FOR VKNA-4U NOZZLE BLADE SECTORS WITH THE SINGLE-CRYSTAL STRUCTURE**

*The production of GTE turbine blades with the single-crystal structure has been presently mastered by a number of engine-producing factories of the aeronautical industry.*

*For the first time the paper takes up the mastering experience in casting technology for VKNA-4U nozzle blade sector with the single-crystal structure, the castings of which are more complicated in structure as compared to separately cast GTE blades. The diagram of sector model block of three blades with the feed-gating system elements, technical characteristics of UVNK-14 unit for the production of single-crystal castings with the height up to 600 mm, basic temperature production parameters of UVNK-14 unit is given along with the analysis of structural defects in the produced castings.*

**Keywords:** single-crystal castings, intermetallide alloys, GTE hot-section components, units for the directional solidification.

---

<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

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «Московское машиностроительное предприятие им. В.В. Чернышева» [Open Joint Stock Company „Moscow Machine-Building Enterprise named after V.V. Chernyshev”] E-mail: zavod@avia500.ru

Интерметаллидные сплавы типа ВКНА, обладающие рядом специфических особенностей: малой плотностью, высокой термостабильностью структуры, незначительным содержанием острodefицитных легирующих элементов, низкой стоимостью, – находят все более широкое применение в авиадвигателестроении. В ВИАМ разработаны и паспортизованы несколько сплавов этого типа: ВКНА-4У, ВКНА-1В и ВКНА-25 [1, 2]. Оптимальным уровнем свойств обладают сплавы с монокристаллической структурой кристаллографической ориентации [111] [3].

Современные технологии литейного производства позволяют эффективно воздействовать на структуру отливок, обеспечивая получение деталей с равноосной, направленной, монокристаллической и регламентированной структурой.

Основной эффект технологии направленной кристаллизации (НК) проявляется благодаря устранению границ зерен, ориентированных перпендикулярно основным действующим напряжениям в лопатках, что позволяет в 2–3 раза повысить ресурс работы изделий [4, 5]. Дополнительные преимущества при технологии НК можно обеспечить получением монокристаллических изделий заданной кристаллографической ориентации (КГО). Еще одна технологическая возможность воздействия на структуру отливок связана с регулированием скорости охлаждения отливки в процессе НК.

Математически скорость охлаждения при НК определяется произведением градиента температур на фронте роста ( $G$ ) на скорость кристаллизации ( $V$ ). Чем выше скорость охлаждения ( $G \cdot V$ ), тем выше степень дисперсности всех структурных составляющих сплава и тем, как правило, выше уровень механических характеристик, особенно на базах испытаний до 1000 ч.

Впервые монокристаллические лопатки из сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой успешно прошли испытания на малогабаритном двигателе ВСУ-10 ОМКБ. Неохлаждаемые лопатки с кристаллографической ориентацией [111] были отлиты на установке в ВИАМ.

В связи с созданием корабельного варианта самолета МиГ-29 и двигателя была поставлена задача: оценить работоспособность сплава ВКНА-4У в сопловых охлаждаемых лопатках первой ступени турбины двигателя РД-33МК. (Работа выполнялась по договору «Отработка технологии и отливка опытной партии секторов лопаток ТВД из сплава ВКНА-4У МОНО» с ОАО «ММП им. В.В. Чернышева».) По имеющейся на заводе оснастке были изготовлены сектора из модельной массы МОН-10К и собраны в блоки с заливочной чашей и стартовым основанием (рис. 1).

Следует отметить, что конструкция сектора сопловых лопаток двигателя РД-33МК чрезвычайно не технологична для литья его с монокристаллической структурой, что вызвало необходимость установки большого количества кристаллопроводов для предотвращения зарождения «паразитных» зерен на отливке. В этом отношении аналогичный блок сопловых лопаток двигателя АЛ-31Ф значительно технологичнее, благодаря отсутствию центрального ребра на нижней полке блока, что позволило выполнить стартовую зону из двух сходящихся к затравке пластин (рис. 2).

В условиях серийного завода на собранные блоки было нанесено огнеупорное покрытие из  $Al_2O_3$  со связующим на основе гидролизованного раствора ЭТС-40 по технологии, принятой в литейном цехе для рабочих лопаток первой ступени с монокристаллической структурой. После удаления модельной массы и прокалики при температуре 1050°C готовые оболочковые формы направлялись в ВИАМ для заливки и кристаллизации в них жаропрочного сплава ВКНА-4У.

В прокаленные керамические формы в ВИАМ устанавливались затравки с кристаллографической ориентацией [111], заделывались огнеупорной суспензией и направлялись на заливку лопаток в установке УВНК-14.



Рис. 1. Модельный блок в сборе со стартовым основанием и заливочной чашей

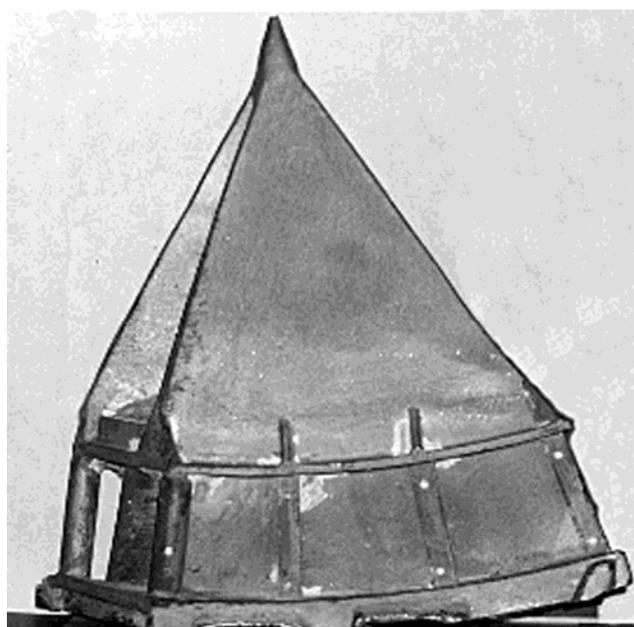


Рис. 2. Блок сопловых лопаток двигателя АЛ-31Ф более технологичный для роста монокристаллов

Установка УВНК-14 предназначена для получения деталей ГТД и ГТУ высотой до 600 мм включительно из жаропрочных и интерметаллидных сплавов нового поколения.

Технические характеристики установки:

- Производительность установки, шт. отливок/сут . . . . . 1–4
- Объем тигля, кг . . . . . 5 или 30
- Напряжение питающей сети, В . . . . . 380<sup>+10%</sup>
- Мощность установленная, кВт . . . . . 400
- Рабочая среда в плавильной камере: вакуум, Па (мм рт. ст.) . . . . . 0,667(5·10<sup>-3</sup>)
- Температура металла в тигле (максимальная), °С . . . . . 1700
- Температура печи подогрева форм, °С . . . . . 1650
- Максимальные размеры рабочего пространства печи подогрева форм (ширина, длина, высота), мм . . . . . 150×400×650
- Скорость вертикального перемещения формы, мм/мин  
     рабочий ход . . . . . 2–15  
     обратный ход . . . . . 120
- Температура алюминия в кристаллизаторе, °С . . . . . 700–800
- Расход охлаждающей воды, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 10–16
- Давление охлаждающей воды на входе в установку, МПа . . . . . 0,25–0,5
- Занимаемая площадь, м<sup>2</sup> (не более) . . . . . 38
- Уровень шума, Дб (не более) . . . . . 75.

Установка снабжена дополнительным альтернативным кристаллизатором в виде водоохлаждаемой емкости с горизонтальными тепловыми экранами над ней.

Следует отметить, что установка УВНК-14, как и установка УВНК-9 (ОАО «ММП им. В.В. Чернышева»), имеет двухуровневую систему компьютерного управления, которая позволяет с помощью сенсорного дисплея управлять всеми узлами и агрегатами установки, осуществлять контроль и запись как в цифровой, так и графической форме температурно-скоростных параметров технологического процесса, а также степени вакуума в

установке. На каждую плавку выдается паспорт с последующей распечаткой полученных данных для анализа выхода годного и уточнения на его основе параметров технологического процесса. (Подробное описание данной системы управления изложено в инструкции оператора «Система управления установкой УВНК-9».)

Подготовка установки УВНК-14 к проведению плавки заключалась в замене комплектов нагревателей, боковых и торцевых экранов, ремонте плавильного тигля, замене элементов графитового крепежа. Отливка блоков сопловых лопаток осуществлялась как по технологии с жидкометаллическим кристаллизатором, так и с помощью альтернативного кристаллизатора в виде охлаждаемой емкости с горизонтальными экранами над ней.

Увеличение глубины погружения формы с крупногабаритной отливкой в охладитель и времени пребывания формы в нем привело к явлению, не наблюдавшемуся при отливке авиационных лопаток ГТД размером до 200–250 мм. Связано оно с тем,

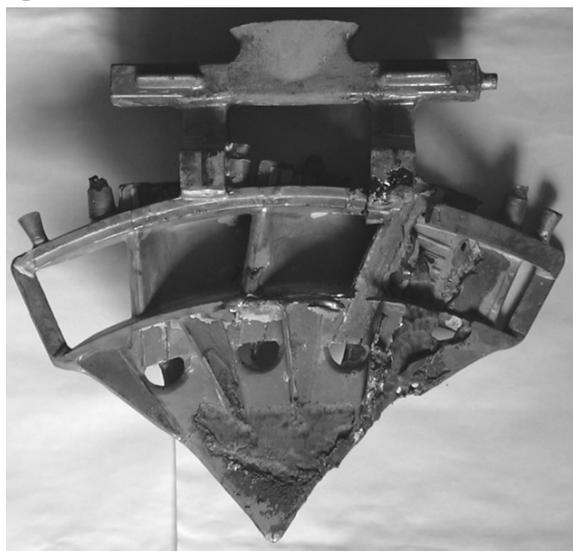


Рис. 3. Дефектный блок сопловых лопаток

что значительная усадка закристаллизовавшегося сплава отливки происходит, как правило, уже после того, как форма с отливкой извлечена из охладителя и находится в печи подогрева форм при температуре 1100–1200°C. При дальнейшем охлаждении, из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения формы и металла, при затрудненной усадке происходит растрескивание формы без каких-либо отрицательных последствий для отливки или оборудования.

При получении крупногабаритных отливок в связи с увеличением времени пребывания формы с отливкой в охладителе и большом гидростатическом давлении охладителя происходит растрескивание ке-

рамической оболочки и попадание охладителя на отливку еще не поднятую в исходную перед заливкой позицию. Попадание охладителя на отливку недопустимо, так как вызывает брак деталей (рис. 3) из-за попадания жидкометаллического охладителя на поверхность отлитых сопловых блоков при появлении трещин в керамической оболочке.

Для выполнения работы в ВИАМ был выплавлен сплав ВКНА-4У из чистых шихтовых материалов. Состав сплава соответствовал требованиям ТУ 1-595-3-664–2004.

Результаты испытания образцов, полученных из этого сплава, также соответствуют требованиям ТУ и составляют: при температуре 20°C –  $\sigma_b=1120$  МПа,  $\delta=12,5\%$ ; при температуре 975°C и напряжении 190 МПа – время до разрушения 84 ч.

Отработка технологических режимов литья секторов лопаток включает:

- определение оптимальных температур нагревателей ППФ (печь подогрева форм);
- определение оптимальной температуры расплава при заливке его в форму;
- определение местоположения формы относительно нижнего нагревателя ППФ с тем, чтобы затравка в стартовой зоне керамической формы не расплавилась полностью и не была бы слишком «холодной»;
- определение скорости нагрева формы от комнатной температуры до рабочей (~1500°C). Эта величина определяется, как правило, термостойкостью керамической формы и для керамики из  $Al_2O_3$  принимается равной 15–25°C/мин;
- определение скорости перемещения формы с расплавом из зоны нагрева в зону охлаждения.

При этом совокупность всех параметров должна обеспечить максимальный выход годного по монокристаллической структуре отливок. В результате проведенной работы были определены все параметры процесса выплавки. По режиму:  $T_{\text{вн}}=1520^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{нн}}=1480^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{расплава}}$  при сливе из индукционной печи  $1520\text{--}1560^{\circ}\text{C}$ , скорость кристаллизации  $5\text{--}8$  мм/мин – были выплавлены заготовки секторов из сплава ВКНА-4У в количестве более 40 шт. Залитые блоки отправляли на завод, где осуществлялась обрезка всех элементов литниковой системы, удаление остатков керамической формы и стержня, травление на макроструктуру отливок и последующая механическая обработка.

Травление на макроструктуру выявило наличие на отдельных лопатках некоторых секторов «паразитных» зерен (указаны стрелками на рис. 4), появление которых связано с наличием заусенцев вокруг знаков керамических стержней и неплотным соединением многочисленных кристаллопроводов, плохо различимых на белом фоне модельной массы.

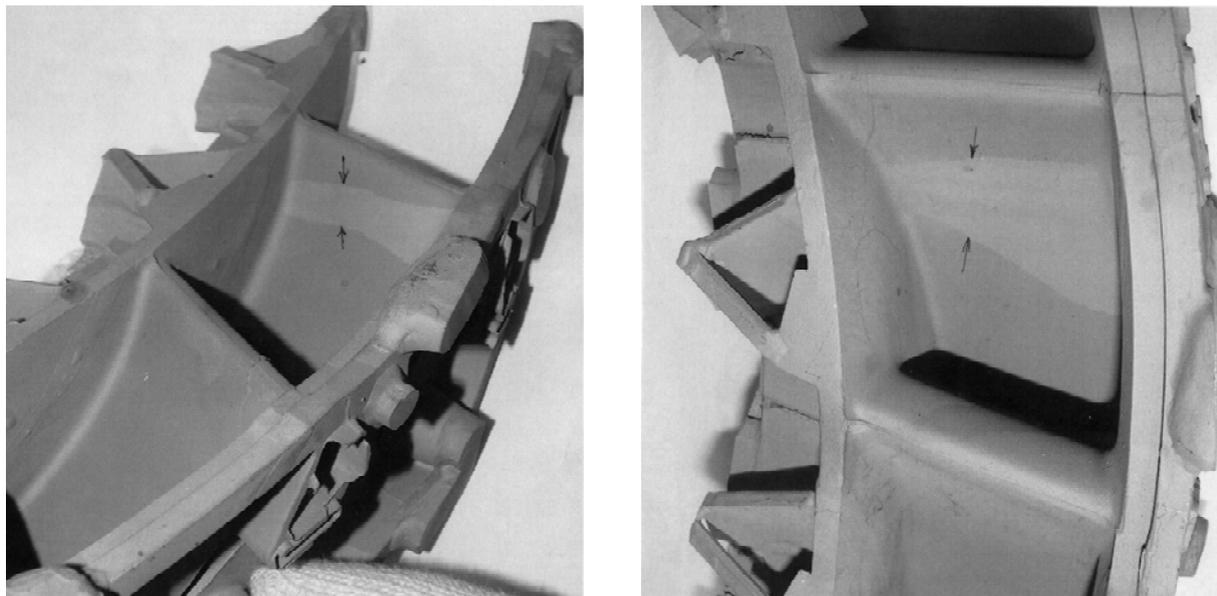


Рис. 4. «Паразитные» зерна, выявленные на некоторых блоках после травления (показаны стрелками)

После проведения всех контрольных операций, сектора направлялись в механический цех, а затем на испытания.

Одновременно в заводских условиях на цеховом литейном оборудовании из того же сплава были получены сектора методом равноосного литья, которые также были механически обработаны и направлены на испытания.

И те и другие сектора прошли длительные испытания в составе изделия. После наработки  $184\text{ ч } 20\text{ мин}$  было проведено исследование двух секторов лопаток соплового аппарата ТВД, отлитых двумя методами. Характер повреждений (локальное обгорание на кромках, термоусталостные трещины, развивающиеся от перфорационных отверстий) у обоих секторов приблизительно одинаковый. Существенного преимущества (по жаростойкости и термостойкости) на лопатках МОНО в сравнении с лопатками с равноосной структурой не выявлено. Однако исследование на оптическом и электронном микроскопах показало, что микроструктура материала сплава ВКНА-4У МОНО более термостабильна по сравнению со структурой сплава ВКНА-4УР при равной наработке при испытаниях.

Для обеспечения требуемого ресурса изделия необходима дальнейшая доработка как конструкции узла, так и сплава ВКНА-4У МОНО в части повышения термостойкости, жаростойкости и способов нанесения покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозафазным упрочнением /Под ред. Е.Н. Каблова, Ю.Р. Колобова. М.: МИСиС. 2008. 328 с.
2. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
4. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. М.: МИСиС. 2001. 632 с.
5. Герасимов В.В., Висик Е.М. Технологические аспекты литья деталей горячего тракта ГТД из интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА с монокристаллической структурой //Литейщик России. 2012. №2. С. 19–23.

#### REFERENCES LIST

1. Struktura i Svojstva intermetallidnyh materialov s nanofaznym uprochneniem [Structure and properties of intermetallic materials with hardening nanophase] /Pod red. E.N. Kablova, Ju.R. Kolobova. M.: MiSIS. 2008. 328 s.
2. Bazyleva O.A., Arginbaeva JE.G., Turenko E.JU. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat-resistant casting intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 57–60.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepλονagruzhenyh gazoturbinnyh dvigatelej [Materials for high-thermal gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
4. Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinnyh dvigatelej [Alloy blades of gas turbine engines]. M.: MiSIS. 2001. 632 s.
5. Gerasimov V.V., Visik E.M. Tehnologicheskie aspekty lit'ja detalej gorjachego trakta GTD iz intermetallidnyh nikelovyh splavov tipa VKNA s monokristallicheskoj strukturoj [Technological aspects of the casting of hot section turbine engine from intermetallic nickel alloys of VKNA with single-crystal structure] //Litejshhik rossii. 2012. №2. S. 19–23.