

УДК 669.018.44

Е.Н. Каблов¹, Ю.А. Бондаренко¹, А.Б. Ечин¹

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ПЕРЕМЕННЫМ УПРАВЛЯЕМЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ГРАДИЕНТОМ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38

Показаны этапы развития процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов во ФГУП «ВИАМ». Представлено исследование условий направленной кристаллизации с переменным управляемым градиентом. Установлены факторы, влияющие на температурный градиент на фронте роста. Подтверждено положительное влияние температурного градиента на формирование однородной тонкодендритной структуры ($\lambda < 200$ мкм) с низкой пористостью ($V_n < 0,05\%$), уменьшение дендритной ликвации на рост прочностных характеристик жаропрочных сплавов. Приведены результаты исследований по направленной кристаллизации высокотемпературных эвтектических сплавов системы «ниобий–кремний».

Работа выполнена в рамках реализации комплексного направления 9.5. «Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1] и направлена на создание концепта «Перспективный двигатель» с соотношением тяги к массе 20:1.

Ключевые слова: *направленная кристаллизация, температурный градиент, никелевый монокристаллический жаропрочный сплав, естественно-композиционная структура, лопатки ГТД, упрочняющая γ' -фаза, γ/γ' -эвтектика, дендритная ликвация, микропористость, кратковременная прочность, длительная прочность.*

E.N. Kablov, Yu.A. Bondarenko, A.B. Echin

Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient

Development stages of the process of directional solidification of engine blades from superalloys in VIAM have been described in this article. Study of directional solidification conditions with variable controlled gradient has been

¹ 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

presented. The factors influencing the temperature gradient at the growth front have been determined. The positive effect of the temperature gradient on the formation of a homogeneous fine-dendritic structure ($\lambda < 200$ microns) with low porosity ($V_p < 0,05\%$), decrease in dendritic segregation on the growth of strength properties of high-temperature alloys has been confirmed. Data of study on directional solidification of eutectic superalloys of «niobium–silicium» system have been provided.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 9.5. «Directional solidification (with variable controlled gradient) of high-temperature superalloys («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1] that is aimed at the creation of the concept «Advanced engine» with thrust-to-weight ratio of 20:1.

Keywords: *directional solidification, temperature gradient, nickel single crystal superalloy, in-situ composite structure, engine blade, γ' -reinforcing phase, γ/γ' -eutectic dendrite segregation, microporosity, short-term strength, long-term strength.*

ВИАМ – ведущий отечественный разработчик технологии получения лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из литейных жаропрочных сплавов методом направленной кристаллизации (НК).

Изначально взамен используемых с середины 1940-х годов лопаток ГТД из деформируемых жаропрочных сплавов (ЖС) академиком С.Т. Кишкиным предложен и реализован в ВИАМ метод точного литья по выплавляемым моделям, обеспечивающий получение охлаждаемых лопаток с внутренней полостью сложной геометрической формы. Разработаны первые литейные никелевые жаропрочные сплавы типа ЖС, показавшие преимущества перед существующими в то время деформируемыми сплавами, предложена гетерофазная теория жаропрочности, позволившая создать основные положения теории их легирования.

В последующих исследованиях, проводимых в ВИАМ под руководством С.Т. Кишкина, на никелевом жаропрочном сплаве ЭИ437 показали, что сплав разрушается по границам зерен, ориентированным перпендикулярно внешней нагрузке, а трещины на этих границах зарождаются в начале второй стадии ползучести. Это позволило сделать вывод о возможности повышения длительной прочности путем исключения из структуры литейного жаропрочного сплава поперечных границ зерен и тем самым была обоснована необходимость формирования структуры в лопатках жаропрочных сплавов с границами зерен, параллельными направлению оси главных напряжений.

В ВИАМ технология получения образцов и лопаток с направленной структурой была реализована в середине 1960-х годов Г.И. Соболевым и В.А. Чумаковым на установке с водоохлаждаемым кристаллизатором по

методу Бриджмена–Стокбаргера. На образцах из сплава ЖС6К был показан прирост жаропрочных свойств и пластичности.

В середине 1960-х – начале 1970-х годов создана промышленная технология направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов ЖС6К и ЖС6У на проходных методических печах ПМП-2 (В.А. Чумаков, И.Д. Абрамсон, И.М. Демонис). Эта технология обеспечивала высокую производительность процесса направленной кристаллизации по сравнению с методом Бриджмена, используемым за рубежом (США, Англия, Франция), а полученные на установках типа ПМП лопатки широко используются в целом ряде изделий Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова.

В конце 1960-х годов Д.А. Петровым и А.Т. Тумановым в ВИАМ начаты работы и получены образцы из жаропрочных сплавов без границ зерен с монокристаллической структурой с использованием затравок заданной кристаллографической ориентации.

В конце 1970-х – начале 1980-х годов в ВИАМ осуществлены работы по направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с жидкометаллическим охладителем [2], созданы специализированные установки ВИАМ-1790 и УВНЭС-3 (В.В. Герасимов, Ю.А. Бондаренко, А.С. Шалимов). Исследования показали, что более эффективный отвод тепла позволяет увеличить скорость охлаждения при формировании дендритно-ячеистой структуры в литейных жаропрочных сплавах, а также получить структуру естественного композита в условиях плоского фронта роста в эвтектических жаропрочных сплавах. В результате в 1980-х – 1990-х годах в ВИАМ создана промышленная технология и высокопроизводительное оборудование – установка УВНК-8П для направленной кристаллизации и монокристаллического литья высокоскоростной направленной кристаллизацией лопаток ГТД из жаропрочных сплавов ЖС26 и ЖС32 при производстве целого ряда изделий Генерального конструктора А.М. Люльки, разработанных в КБ им. В.Я. Климова и др.

В то же время на модернизированной установке УВНЭС-3 Ю.А. Бондаренко удалось на эвтектических жаропрочных сплавах типа ВКЛС в условиях плоского фронта роста получить структуру естественного композита, представляющую собой никелевую жаропрочную матрицу, упрочненную волокнами карбида ниобия. По разработанной технологии были изготовлены опытные партии охлаждаемых и неохлаждаемых рабочих лопаток различных конструкций [3], а проведенные горячие испытания лопаток показали работоспособность и преимущества естественных композитов по сравнению с существующими в то время литейными жаропрочными сплавами.

Для повышения качества структуры ЖС путем улучшения ее однородности, уменьшения дендритной ликвации и пористости в 1990-х и начале

2000-х годов в ВИАМ Е.Н. Кабловым и Ю.А. Бондаренко был разработан процесс высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК) [2, 4, 5]. Вследствие того, что направленная дендритная структура формируется на фронте кристаллизации в жидко-твердой зоне в интервале температур T_S и T_L жаропрочных сплавов, характер их структуры во многом определяется величиной температурного градиента на фронте кристаллизации. В процессе исследований разработана и реализована экспериментальная методика оценки условий процесса направленной кристаллизации, позволившая определять значения температурного градиента на фронте кристаллизации, величину (протяженность) жидко-твердой зоны, где формируется направленная дендритная структура, положение фронта кристаллизации относительно зоны нагрева и охлаждения. Для этого использовали кривые распределения температур по высоте теплового узла установки, полученные в процессе направленной кристаллизации с помощью термопар, установленных внутри и на поверхности отливки.

Исследования влияния условий направленной кристаллизации на структуру ЖС позволили установить [6], что при невысоком температурном градиенте (по существующей за рубежом промышленной технологии) при направленной кристаллизации на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе отвод тепла осуществляется только за счет радиального охлаждения, размер жидко-твердой зоны достаточно велик — десятки миллиметров. В этом случае происходит формирование крупнодендритной структуры с развитыми осями второго порядка, что сопровождается дендритной ликвацией легирующих элементов между осями дендритов и межосным пространством. В процессе роста дендритов в их основании в последнюю очередь кристаллизуются остатки расплава и вследствие различия молярных объемов жидкой и твердой фаз там формируются междендритные поры. При использовании жидкометаллического охладителя отливка охлаждается в 3–4 раза эффективнее, это обеспечивает уменьшение размера жидко-твердой зоны на фронте кристаллизации, в сплаве формируется структура с меньшими по размеру дендритами, меньшими пористостью и дендритной ликвацией.

Экспериментально были определены главные факторы, обеспечивающие повышение температурного градиента на фронте кристаллизации при получении деталей с помощью направленной кристаллизации: повышение температуры перед фронтом кристаллизации, эффективный отвод тепла ниже фронта кристаллизации за счет понижения температуры охладителя, применение эффективных тепловых экранов между зоной нагрева и зоной охлаждения, уменьшение расстояния между нагревателями и охладителем, повышение теплопроводности керамической формы.

Установлено также, что при ВГНК жаропрочных сплавов в них формируется более однородная и тонкодендритная структура, с меньшей дендритной ликвацией (в 1,5 раза) и пористостью (в 8–10 раз). Автордиографический анализ с применением радиоактивного изотопа ^{63}Ni позволил установить, что ВГНК за счет улучшения качества структуры обеспечивает двухкратное уменьшение диффузионной проницаемости, а это содействует повышению термической стабильности и снижению темпов разупрочнения ЖС [7]. На интерметаллидном сплаве ВКНА-1В (плотность 7,9 г/см³) показано повышение прочностных характеристик (на 10–20%) и выносливости (на 30%).

Полученные результаты позволили приступить к детальным исследованиям влияния процесса направленной кристаллизации с управляемым переменным температурным градиентом [1, 8, 9] на особенности дендритной структуры, размер упрочняющих фаз, пористость и прочностные характеристики жаропрочных сплавов. Все исследования проведены на созданной во ФГУП «ВИАМ» высокоградиентной установке УВНС-5 с компьютерной системой управления основными параметрами технологического процесса, при этом использовали монокристаллический жаропрочный сплав ВЖМЗ, а управление величиной температурного градиента на фронте роста осуществляли изменением конструкции теплового узла установки УВНС-5, температурой в зоне нагрева и охлаждения, наличием или отсутствием жидкометаллического охладителя. Значения температурного градиента на фронте кристаллизации оценивали по методике, разработанной во ФГУП «ВИАМ», с помощью термопар, закрепленных на керамической форме [10].

Анализ микроструктуры на поперечных шлифах показал, что при росте значений температурного градиента G с 20 до 200°C/см расстояние между осями дендритов первого порядка (параметр λ) уменьшается с 310 до 140 мкм. Аналогичная картина наблюдается и с ростом скорости кристаллизации R (рис. 1 и 2), такая же зависимость прослеживается и при оценке размера упрочняющей γ' -фазы в осях (с 0,6 до 0,2 мкм) и межосном пространстве дендритов (с 1,5 до 0,6 мкм) (рис. 3 и 4). Размер выделений частиц γ/γ' -эвтектики с ростом G и R уменьшается с 19 до 7 мкм (рис. 5), объемная доля микропор – с 0,124 до 0,011%.

На основании полученных экспериментальных данных построены зависимости влияния температурного градиента и скорости кристаллизации на размер дендритной ячейки (λ), размер частиц упрочняющей γ' -фазы в осях и межосном пространстве дендритов, размер частиц γ/γ' -эвтектики, объемную долю пористости (рис. 6) [11, 12].

Кривые, описывающие влияние скорости кристаллизации на размер междендритного расстояния, размеры частиц γ' -фазы, размеры частиц

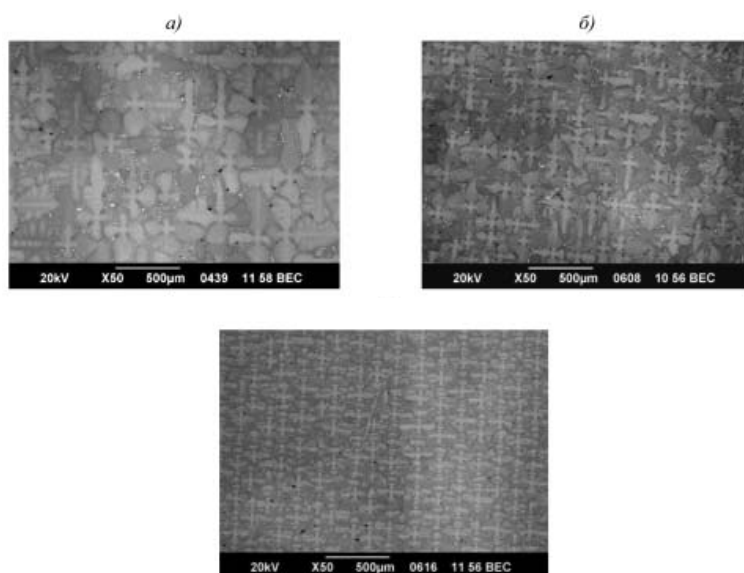


Рис. 1. Дендритная структура литых образцов из сплава ВЖМ3 при разных температурных градиентах и одинаковой скорости кристаллизации $R=5$ мм/мин, $\times 50$:
 $a - G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$; $б - G \approx 50^\circ\text{C}/\text{см}$; $в - G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$

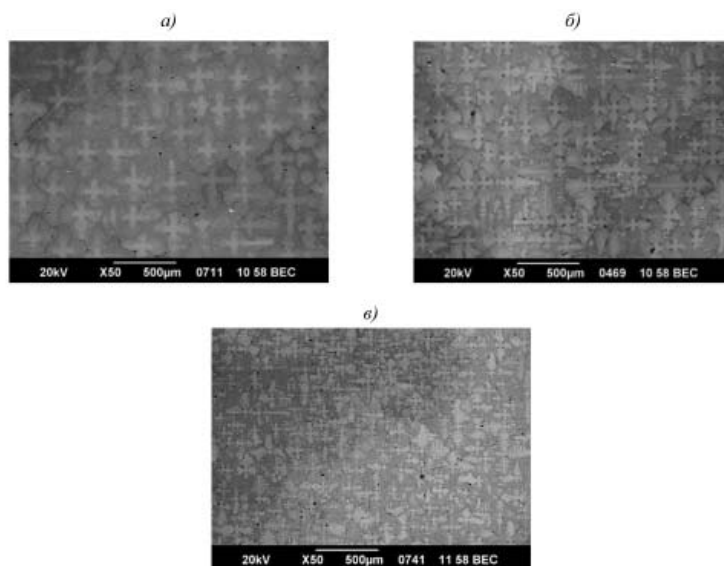


Рис. 2. Дендритная структура литых образцов из сплава ВЖМ3 при постоянном температурном градиенте $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$ и разных скоростях кристаллизации, $\times 50$:
 $a - R=1$ мм/мин; $б - R=5$ мм/мин; $в - R=10$ мм/мин

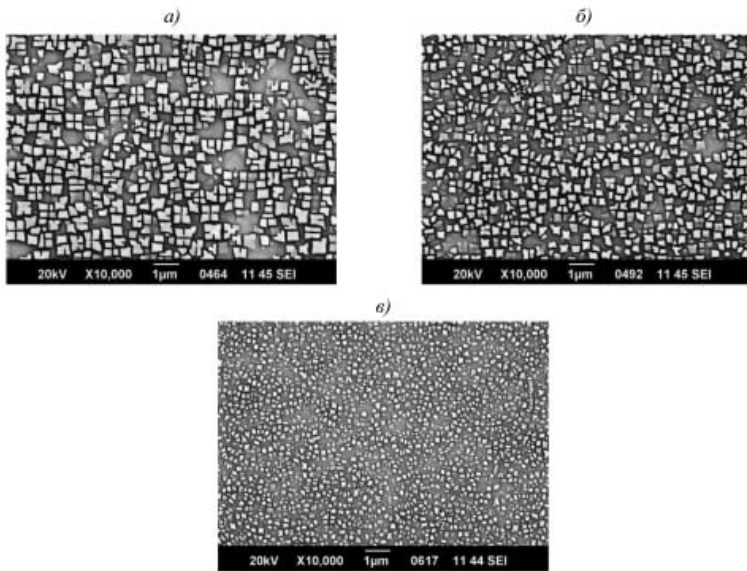


Рис. 3. Морфология упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов при разных температурных градиентах и одинаковой скорости кристаллизации $R=5$ мм/мин, $\times 10000$:
 $a - G \approx 20^\circ\text{C}/\text{cm}$; $б - G \approx 100^\circ\text{C}/\text{cm}$; $в - G \approx 200^\circ\text{C}/\text{cm}$

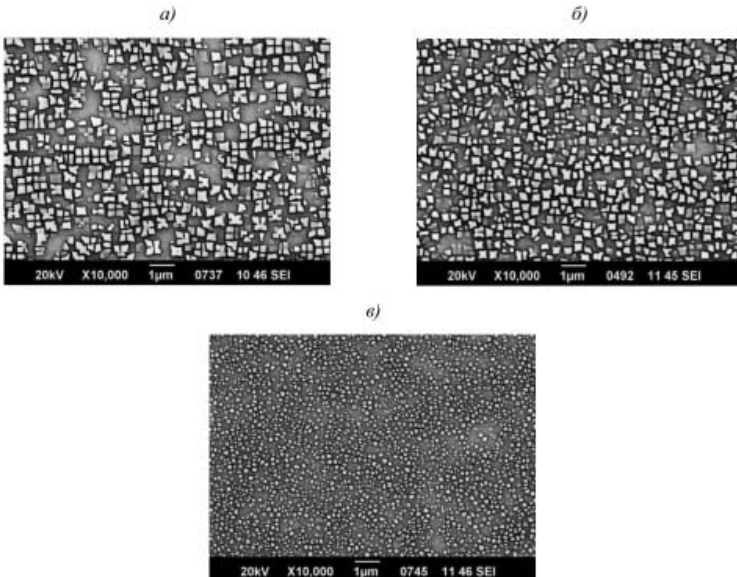


Рис. 4. Морфология упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов при постоянном температурном градиенте $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{cm}$ и разных скоростях кристаллизации, $\times 10000$:
 $a - R=1$ мм/мин; $б - R=5$ мм/мин; $в - R=10$ мм/мин

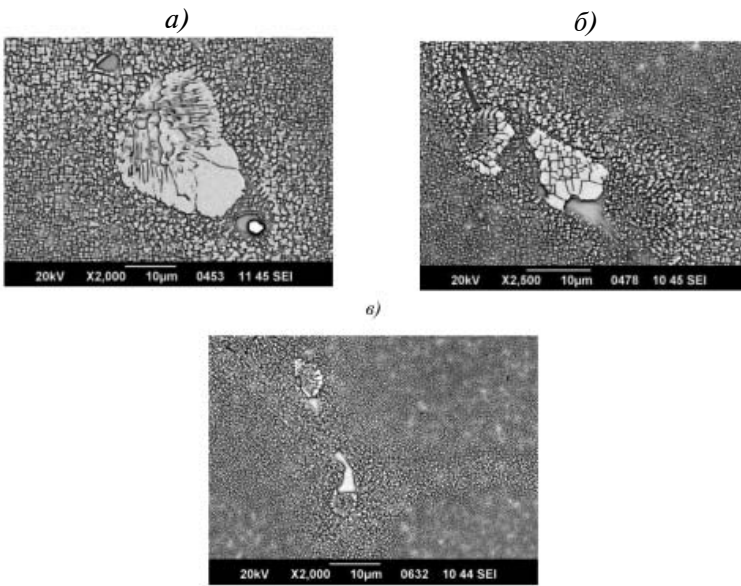


Рис. 5. Литейные микропоры и γ/γ' -эвтектические выделения при разных температурных градиентах и одинаковой скорости кристаллизации $R=5$ мм/мин:
a – $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{cm}$; *b* – $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{cm}$; *v* – $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{cm}$

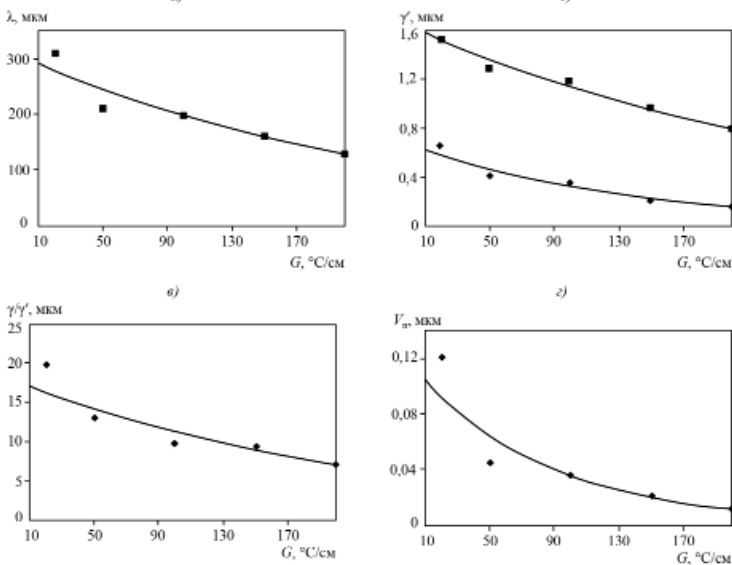


Рис. 6. Зависимость размера от значений температурного градиента в осях дендритов (\blacklozenge) и межзональном пространстве (\blacksquare):
a – дендритной ячейки (λ); *б* – частиц γ' -фазы; *в* – частиц γ/γ' -эвтектики; *г* – объемной доли пористости (V_p)

γ/γ' -эвтектики, пористости имеют близкий характер, т. е. с ростом температурного градиента размер всех этих параметров плавно уменьшается.

С использованием полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов определили закономерности влияния скорости охлаждения на размер структурных составляющих – междендритного расстояния, частиц γ' -фазы, частиц γ/γ' -эвтектики, пористости.

Полученные закономерности могут быть представлены в виде следующих уравнений:

$$\lambda=447(GR)^{-0,23}, \quad (1)$$

$$d_{\gamma' \text{ в осях}}=2,4(GR)^{-0,53}, \quad (2)$$

$$d_{\gamma' \text{ м/о}}=4,0(GR)^{-0,35}, \quad (3)$$

$$d_{\gamma/\gamma'}=50(GR)^{-0,40}. \quad (4)$$

Таким образом, видно, что размер структурных составляющих связан с изменением скорости охлаждения известным соотношением Броди–Флемингса:

$$d=a(GR)^{-n},$$

где $d_{\gamma' \text{ в осях}}$ и $d_{\gamma' \text{ м/о}}$ – средний размер структурных составляющих в оси дендрита и в межосном пространстве соответственно; a – коэффициент, пропорциональный интервалу кристаллизации; G – температурный градиент; R – скорость перемещения фронта кристаллизации; n – показатель степени.

По результатам аппроксимации полученных уравнений установлено, что экспериментальные данные достаточно достоверно описываются степенной зависимостью, которая имеет вид гиперболы.

Анализ результатов локального химического состава монокристаллических образцов из сплава типа ВЖМЗ и значений коэффициентов дендритной ликвации показывает, что оси дендритов обогащены тугоплавкими элементами – W, Re, межосное пространство – Al, Cr, Mo, Ta.

Установлено, что при повышении температурного градиента неоднородность химического состава уменьшается, а это особенно важно для современных монокристаллических сплавов с повышенным содержанием тугоплавких элементов (W, Re), играющих важную роль в упрочнении ЖС и имеющих малую диффузионную подвижность в никелевом твердом растворе.

Проведенные исследования позволили установить, что повышение скорости кристаллизации увеличивает неоднородность химического состава внутри дендритных ячеек, вызванную дендритной ликвацией. Это особенно заметно при низком температурном градиенте, где размер жидко-твердой фазы на фронте роста протяженнее, чем при высоком градиенте.

Вследствие этого, при низком температурном градиенте для уменьшения дендритной ликвации необходимо уменьшать скорость кристаллизации.

Частицы γ/γ' эвтектики в большей степени обогащены Al, Ta, Nb. Карбидная фаза наряду с углеродом содержит значительное количество Ta (до 60% (по массе)), что позволяет предположить, что эта фаза – TaC. Выделения карбидной фазы концентрируются в междендритном пространстве – по границам осей второго порядка – в виде скоплений пластин. Можно заметить, что с повышением температурного градиента и скорости кристаллизации размер пластин и их толщины уменьшаются [11, 12].

В табл. 1 приведены результаты испытаний на растяжение при 20 и 980°C, а также на длительную прочность (время до разрушения) при температуре 1100°C и нагрузке $\sigma=120$ МПа.

Таблица 1

Механические свойства* литых образцов из жаропрочного сплава типа ВЖМЗ с монокристаллической структурой и КГО <001>

Температурный градиент, G , °C/см	Значения свойств при температуре испытания, °C				Время до разрушения, ч, при 1100°C и $\sigma=120$ МПа
	20		980		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	
	МПа				
20	86,0	78,0	70,0	66,0	55
50	102,0	86,0	74,0	67,0	89
100	108,0	89,0	75,0	68,0	120
150	114,0	91,0	75,0	69,0	131
200	120,0	93,0	76,0	72,0	134

* Средние значения по результатам испытаний 3–5 образцов.

Установлено, что увеличение значений температурного градиента на фронте кристаллизации повышает предел прочности при 20°C в ~1,5 раза, при 980°C – на 10%, время до разрушения при испытании на длительную прочность увеличивается в ~3 раза.

Для реализации процесса ВГНК в промышленности во ФГУП «ВИАМ» спроектирована и изготовлена высокопроизводительная установка УВНС-6 с компьютерной системой управления. Эксплуатация установки свидетельствует, что полученные в ней отливки образцов имеют однородную, тонкодендритную структуру ($\lambda \approx 160$ мкм), низкую пористость, высокий уровень свойств, выход годного по монокристаллической структуре >90% [13].

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» на базе разработанного процесса ВГНК ведутся исследования по созданию новых высокотемпературных

жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц, применение которых позволит повысить температуру газа перед турбиной до 2100–2400 К, а также обеспечит уменьшение плотности, сокращение расхода топлива, увеличение тяги и надежности авиационных ГТД нового поколения.

Наиболее перспективными материалами могут быть естественные композиты (*in-situ*) на основе системы Nb–Si, имеющие эвтектику Nb–Nb₃Si с температурой плавления 1920°C, полученные методом направленной кристаллизации. Эти композиты обладают пониженной плотностью (7,2–7,6 г/см³ вместо 8,9–9,2 г/см³ у современных никелевых монокристаллических жаропрочных сплавов), сохраняют работоспособность до температуры 1350°C [14].

Для разработки процесса направленной кристаллизации высокотемпературных жаропрочных эвтектических сплавов на основе ниобиевой матрицы, упрочненной интерметаллидом силицида ниобия, во ФГУП «ВИАМ» создана вакуумная высокотемпературная установка УВНЭС-4М с двухзонной печью подогрева форм с рабочей температурой до 1850°C, жидкометаллическим охладителем (с температурой ~350°C), тепловыми экранами, отделяющими зону нагрева от зоны охлаждения, с автоматизированной системой управления основными параметрами технологического процесса на основе промышленного компьютера. Процесс ВГНК осуществляли в керамических тиглях и формах, изготовленных на основе оксида иттрия по разработанной во ФГУП «ВИАМ» технологии.

В результате проведенных исследований разработана технология ВГНК, обеспечивающая формирование естественной композиционной структуры, и получены опытные партии заготовок образцов.

Детальное исследование структуры, проведенное методами оптической и электронной микроскопии, а также микрорентгеноспектрального анализа, свидетельствует, что естественный композит, сформированный в условиях совместного роста эвтектических фаз, состоит из эвтектических колоний, ориентированных в направлении кристаллизации (рис. 7). Структура внутри колоний состоит из чередующихся параллельных пластин твердого раствора на основе ниобия и интерметаллида на основе силицида ниобия, состав фаз приведен в табл. 2. Объемная доля силицида ниобия составляет 33–35%, плотность композита ~7,45 г/см³ [15].

Таблица 2

Состав фаз композита на основе Nb–Si

Фаза	Содержание элементов в фазе, % (по массе)					
	Ti	Hf	Cr	Al	Si	Nb
Твердый раствор ниобия	8,0	9,0	3,0	0,9	2,1	77,0
Силицид ниобия	9,0	19,0	0,4	1,0	19,6	51,0

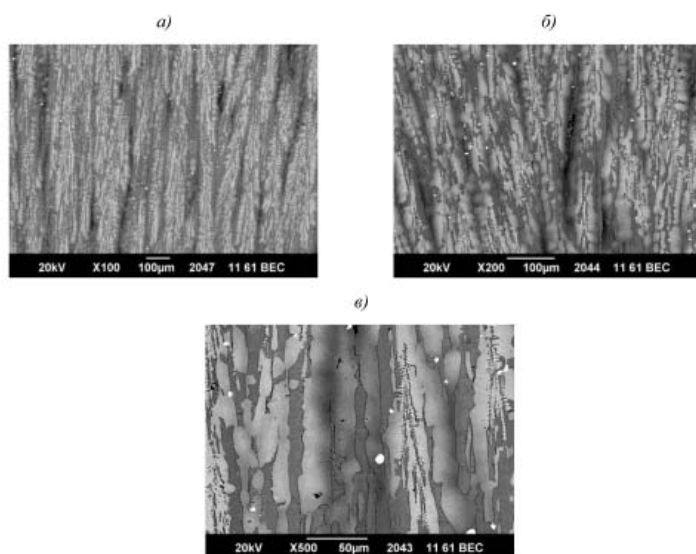


Рис. 7. Микроструктура заготовки образца из высокотемпературного жаропрочного сплава на основе ниобиевой матрицы, полученного методом направленной кристаллизации:
 $a - \times 100$; $b - \times 200$; $c - \times 500$



Рис. 8. Внешний вид образцов после испытания механических свойств из сплава на основе ниобиевой матрицы

Оценка механических свойств, проведенная на полученных образцах (кратковременная прочность при 20 и 1200°С, длительная прочность при 1200°С), показала, что при 1200°С естественный композит на основе системы Nb–Si в ~2 раза превосходит высокотемпературный интерметаллидный монокристаллический сплав ВКНА-1В с плотностью ~7,9 г/см³ (рис. 8).

Используя керамические формы из оксида иттрия, изготовленные методом точного литья по выплавляемым моделям, разработана технология и получены экспериментальные образцы деталей лопаток, а также отливки неохлаждаемой лопатки ГТД реальной конструкции. Металлографический анализ показал, что по длине детали (за исключением стартовой зоны) как в тонком сечении (перо лопатки ГТД), так и в толстом сечении (замок лопатки ГТД), формируется структура естественного композита (рис. 9).

Полученные результаты свидетельствуют, что в области направленной кристаллизации жаропрочных сплавов ФГУП «ВИАМ» не уступает своих позиций в мире.

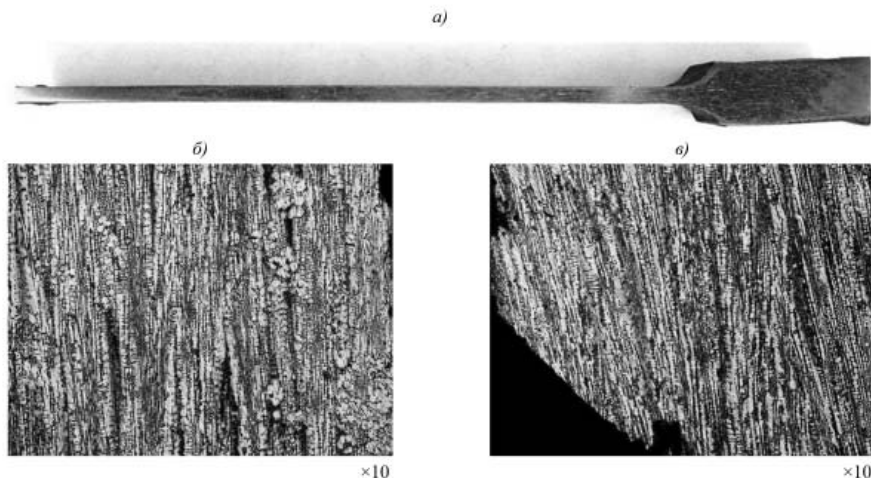


Рис. 9. Структуры естественного композита в экспериментальном образце детали:
 а – макроструктура образца детали;
 б, в – микроструктуры соответственно в тонком и толстом сечениях

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
3. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Панкратов В.А. Особенности получения рабочих лопаток малогабаритных ГТД из сплавов типа ВКЛС-20 // Авиационная промышленность. 1993. №2. С. 9–10.
4. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа RENE-N5 // МиТОМ. 1999. №2. С. 15–18.
5. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
6. Бондаренко Ю.А. Перспективы технологии направленной кристаллизации крупногабаритных рабочих лопаток наземных газовых турбин // Материаловедение. 1998. №7. С. 21–25.
7. Аристова Е.Ю., Белова Е.Н., Бондаренко Ю.А., Гинзбург С.С. и др. Самодиффузия никеля по внутренним поверхностям раздела в жаропрочном сплаве на основе сложнoleгированного интерметаллида Ni_3Al // Доклады Академии наук. Сер.: Металлы. 1996. №3. С. 113–120.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов $\langle 001 \rangle$ высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
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 (22). С. 3–8.
10. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Влияние температурного градиента на структуру жаропрочного сплава при его направленной кристаллизации // Литейщик России. 2014. №5. С. 24–28.
11. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Особенности структуры и свойства никелевого монокристаллического сплава, полученного в условиях переменного температурного градиента на фронте роста // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1.

12. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Влияние переменного температурного градиента на дисперсность структуры Re-содержащего сплава // Литейное производство. 2015. №10. С. 33–36.
13. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Новая промышленная высокоградцентная установка направленной кристаллизации УВНС-6, ее характеристики и преимущества // Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №2. Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 14.10.2016).
14. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Колодяжный М.Ю., Нарский А.Р. Современные исследования в области технологии выплавки и направленной кристаллизации, обеспечивающие формирование естественно-композиционной структуры в высокожаропрочных сплавах на основе ниобий-кремния для деталей горячего тракта ГТД // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. №4. Ст. 01. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 14.10.2016).
15. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Колодяжный М.Ю. Особенности формирования естественно-композиционной структуры эвтектического сплава Nb–Si при направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе // Электрометаллургия. 2016. №11. С. 2–8.