



УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА
НИКЕЛОВОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО В
УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО
ГРАДИЕНТА НА ФРОНТЕ РОСТА**

А.Б. Ечин

Ю.А. Бондаренко
доктор технических наук

Август 2015

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 СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ФРОНТЕ РОСТА

Представлено исследование влияния условий направленной кристаллизации (температурного градиента и скорости кристаллизации) на междендритное расстояние, размер частиц упрочняющей γ' -фазы в осях и межосных участках дендритов, объемную долю и размер пор, размер частиц эвтектической γ/γ' -фазы, особенности дендритной ликвации и механические свойства монокристаллического литейного жаропрочного сплава.

Ключевые слова: *направленная кристаллизация, температурный градиент, никелевый монокристаллический жаропрочный сплав, упрочняющая γ' -фаза, пористость, эвтектика, дендритная ликвация, микроструктура.*

A.B. Echin, Y.A. Bondarenko

STRUCTURAL FEATURES AND PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL Ni-BASED SUPERALLOY PRODUCED UNDER CONDITIONS OF VARIABLE TEMPERA- TURE GRADIENT ON THE SOLIDIFICATION FRONT

Research of an influence of the directional crystallization conditions (temperature gradient and crystallization rate) on the dendrite arm spacing, size of strengthening γ' -phase in axes and interdendritic areas, porosity, size of eutectic γ/γ' -phase particles, features of segregation and mechanical properties of cast single-crystal superalloy is described in the article.

Keywords: *directional solidification, temperature gradient, single-crystal Ni-based superalloy, strengthening γ' -phase, porosity, eutectic, dendritic segregation, microstructure.*

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 большинство наиболее нагруженных деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) – охлаждаемые и неохлаждаемые рабочие лопатки –

изготавливают методом направленной кристаллизации, обеспечивающим получение в отливках столбчатой или монокристаллической структуры [1, 2]. При их получении используют специально созданные многокомпонентные никелевые жаропрочные сплавы [3, 4], максимально легированные тугоплавкими элементами переходных металлов Mo, W, Ta, Re в количестве, ограниченном только предельной растворимостью в γ' -твердом растворе и равновесной с ним γ' -фазе.

Вследствие того, что лопатки ГТД имеют сложную геометрическую форму, их отливают в керамических формах, получаемых по выплавляемым моделям [1]. Промышленная технология направленной кристаллизации лопаток ГТД с монокристаллической структурой базируется на известном методе Бриджмена [5], в котором процесс направленной кристаллизации осуществляется перемещением керамической формы с расплавом жаропрочного сплава на водоохлаждаемом кристаллизаторе из зоны нагрева в зону охлаждения. Погружая керамическую форму в процессе кристаллизации в жидкометаллический охладитель [6] можно за счет конвективного охлаждения добиться существенного повышения скорости отвода тепла [7, 8]. Получение отливок с монокристаллической структурой происходит в условиях неравновесной кристаллизации, при этом формируется неоднородная по химическому составу дендритная структура, где наиболее развитые оси первого порядка формируются в направлении отвода тепла. Эта особенность дендритного роста связана с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) неупорядоченного никелевого γ -твердого раствора жаропрочного сплава. В структуре дендритов присутствуют различные по размеру и форме частицы упрочняющей γ' -фазы, выделения глобулярных частиц (γ - γ')-эвтектики, закристаллизовавшейся в межосных участках, там же присутствуют поры, механизм образования которых обусловлен различием молярных объемов частиц жидкой и твердой фаз [8–10].

Ранее в работах [7, 8, 11] установлено, что повышение температурного градиента в условиях дендритного роста уменьшает размер жидко-твердой зоны перед фронтом кристаллизации, а это облегчает подпитку расплавом основания дендритов, содействует уменьшению размера дендритов, количества междендритных пор, а также уменьшению дендритной ликвации в жаропрочных сплавах.

Целью данной работы является детальное изучение влияния условий направленной кристаллизации (температурного градиента и скорости кристаллизации) на междендритное расстояние, размер частиц упрочняющей γ' -фазы в осях и межосных участках дендритов, объемную долю и размер пор, размер частиц эвтектической (γ/γ')-фазы,

а также особенности дендритной ликвации монокристаллического литейного жаропрочного сплава.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран разработанный в ВИАМ ренийсодержащий малоуглеродистый сплав ВЖМЗ для монокристаллического литья, имеющий высокие жаропрочные свойства [3, 12].

Процесс направленной кристаллизации осуществляли на созданной в ВИАМ опытно-промышленной установке УВНС-5 с автоматизированной системой управления на базе промышленного компьютера [8–10]. Особенности технологии и конструкции теплового узла установки защищены патентами Российской Федерации. Тепловые условия процесса направленной кристаллизации оценивали с помощью вольфрам-рениевых термопар марки ВР-5/20, установленных на поверхности керамических форм. С их помощью графически строили кривые распределения температуры по высоте теплового узла установки в процессе направленной кристаллизации, а значения температурного градиента на фронте кристаллизации определяли на кривых, оценивая разницу температур между точкой с температурой $\sim 1300^\circ\text{C}$ (приблизительно температура солидус сплава) и температурой точки, лежащей выше на 1 см [13].

Структурные исследования осуществляли на поперечных шлифах монокристаллических образцов с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$. Оценку микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Leica, растровом электронном микроскопе JSM-6490LV в режимах SEL и BEC, а микрорентгеноспектральный анализ – на «Суперпроб-733».

Результаты

Исследование проводили на монокристаллических образцах из сплава ВЖМЗ, полученных методом направленной кристаллизации при температурном градиенте G приблизительно: 20; 50; 100; 150 и $200^\circ\text{C}/\text{см}$ и скорости кристаллизации R : 1; 5 и 10 мм/мин.

В результате анализа установлено, что во всех образцах сформирована характерная для никелевого жаропрочного монокристаллического сплава направленная дендритная структура, в которой оси дендритов ориентированы в направлении кристаллизации. Дендриты (рис. 1) представляют собой $(\gamma-\gamma')$ -твердый раствор, упрочненный частицами γ' -фазы, размер упрочняющей фазы в осях дендритов и на их перифе-

рии заметно различается, что обусловлено условиями кристаллизации (рис. 2). В междендритных областях расположены эвтектика γ - γ' и карбиды, также видны литейные поры (рис. 3).

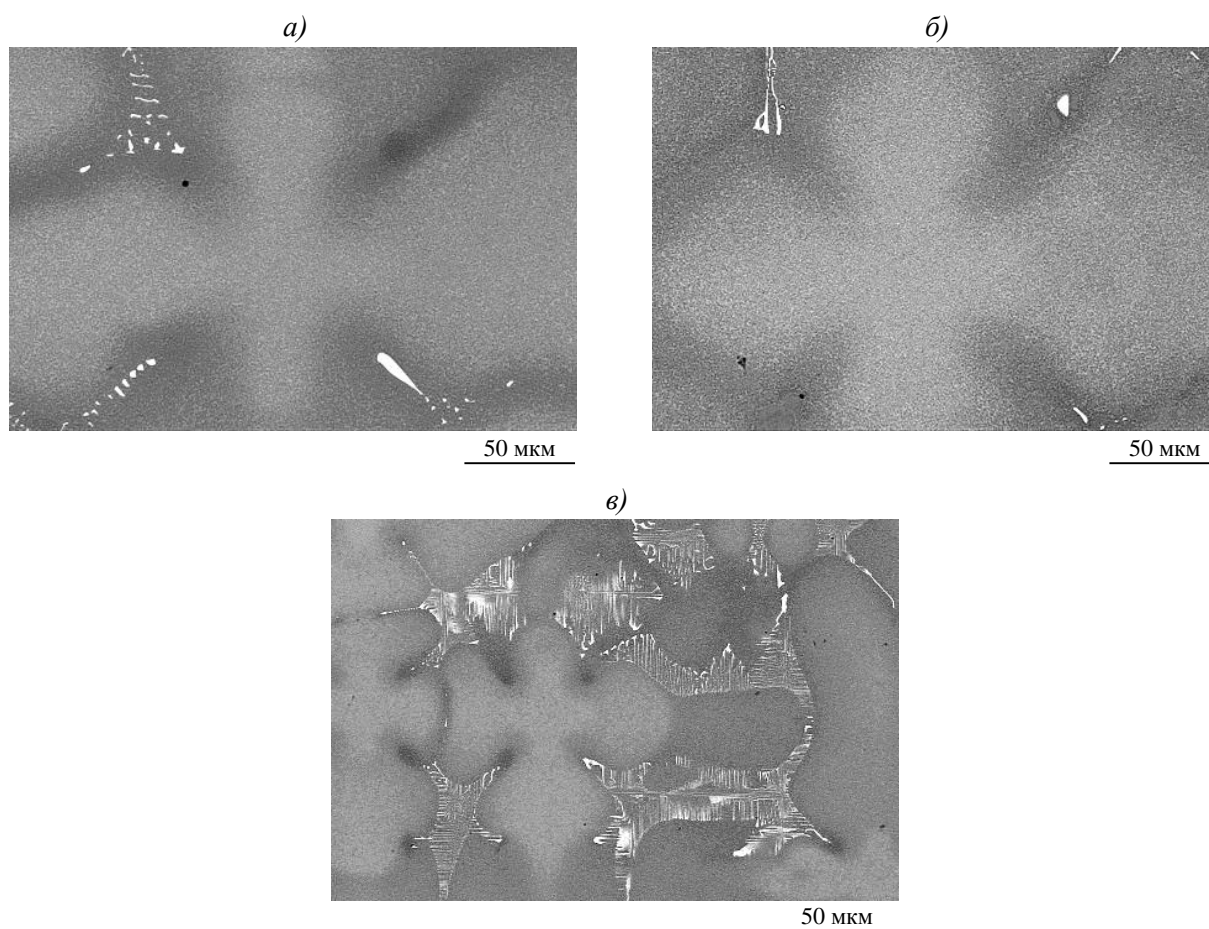


Рис. 1. Характерная дендритная структура ($\times 500$) сплава ВЖМЗ:
a – $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин; *б* – $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$, $R \approx 1$ мм/мин; *в* – $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$, $R \approx 10$ мм/мин

Металлографические исследования* по определению междендритного расстояния (λ , мкм), проведенные на поперечных шлифах после травления, позволили установить (см. рис. 1), что с ростом температурного градиента (с $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$ до $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$), при постоянной скорости кристаллизации $R = 5$ мм/мин, размер междендритного расстояния уменьшается более чем в 2 раза – с $\lambda = 310$ мкм до $\lambda = 130$ мкм. Результаты этого исследования приведены на рис. 4, *a*. Аналогичная тенденция наблюдается и с ростом скорости кристаллизации (с $R = 1$ мм/мин до $R = 10$ мм/мин) при постоянных температурных градиентах: $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$, $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$ соответственно (рис. 4, *б*).

Оценка размера частиц упрочняющей γ' -фазы в осях и межосном пространстве дендритов в зависимости от условий направленной кристаллизации (см. рис. 2) позволила установить, что повышение температурного градиента (с $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$ до $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$) при постоянной скорости кристаллизации $R = 5$ мм/мин, а также увеличе-

ние скорости кристаллизации (с $R=1$ мм/мин до $R=10$ мм/мин) приводит к уменьшению размера частиц γ' -фазы – с 0,6 до 0,2 мкм в осях дендритов и с 1,5 до 0,6 мкм в межосном пространстве (рис. 5, а, б).

* Металлографические исследования проводили с участием О.Б. Тимофеевой, В.Г. Колодочкиной, И.В. Исходжановой, М.А. Лаптевой.

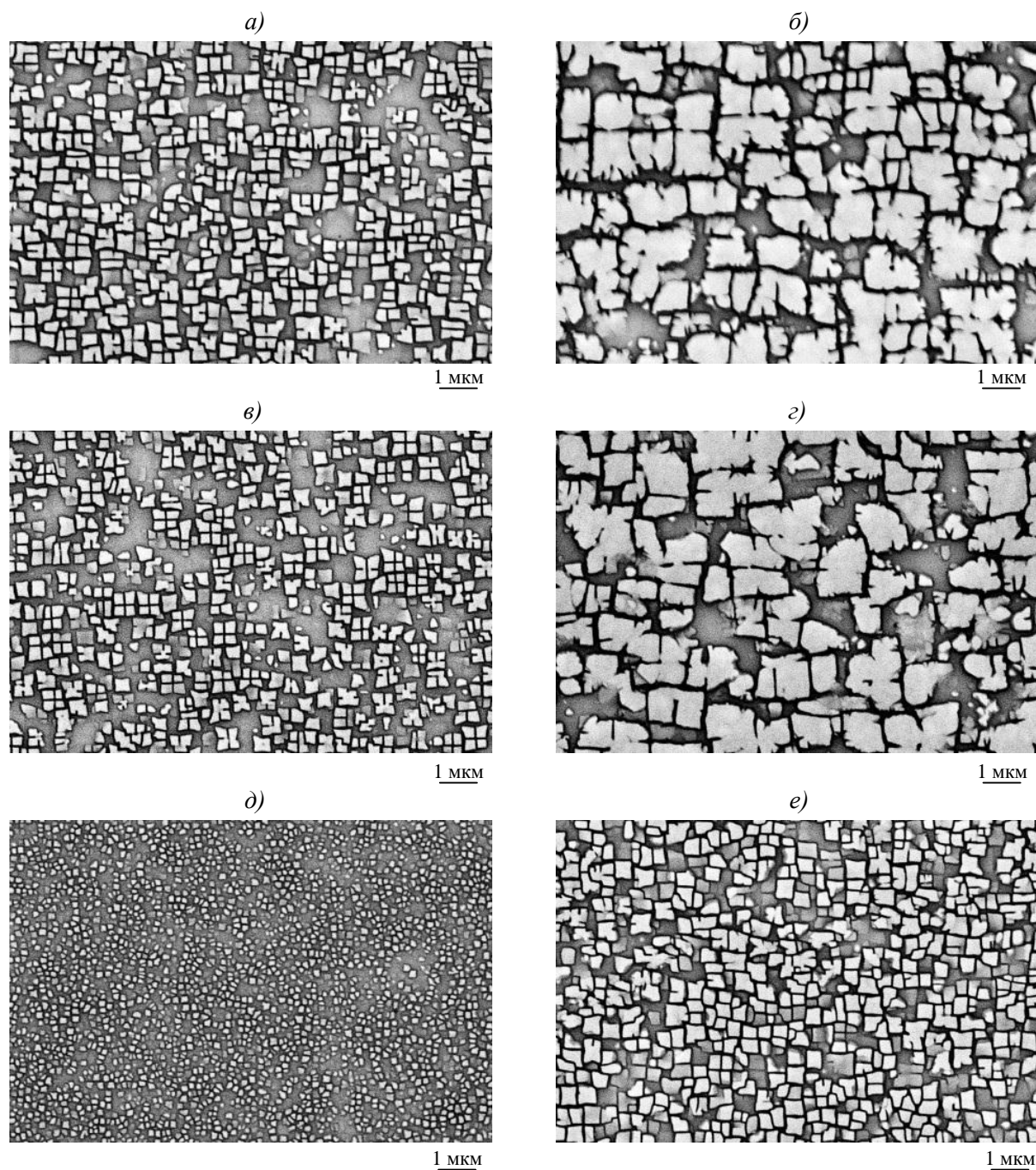


Рис. 2. Характерная дендритная структура ($\times 10000$) сплава ВЖМЗ:
а, в, д – ось дендрита; б, г, е – межосное пространство; а, б – $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин;
в, г – $G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$, $R \approx 1$ мм/мин; д, е – $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$, $R \approx 10$ мм/мин

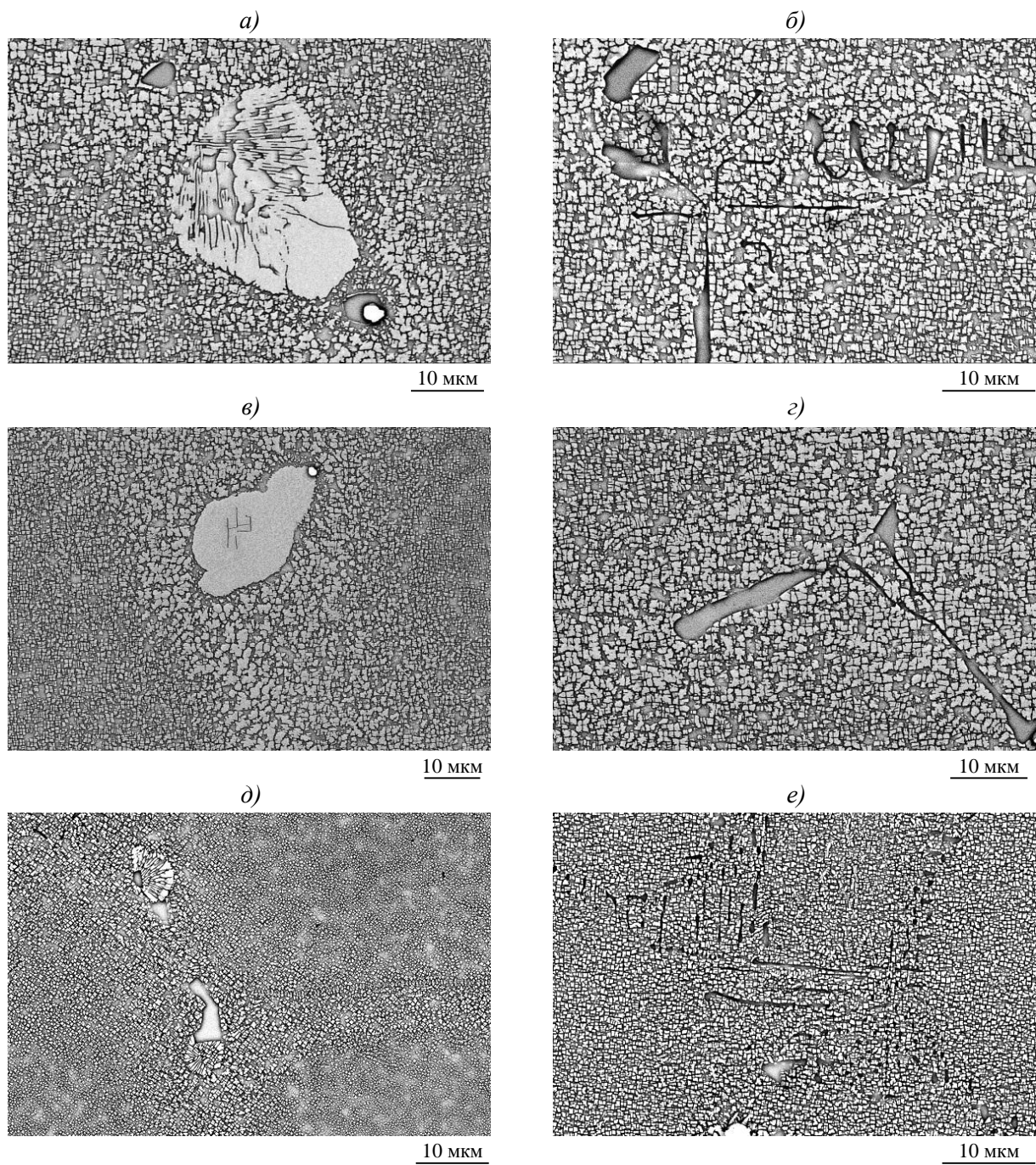


Рис. 3. Характерная дендритная структура (*a, г, д* – $\times 2000$; *б, е* – $\times 2500$; *в* – $\times 1500$) сплава ВЖМЗ:

a – $(\gamma-\gamma')$ -эвтектика и пора ($G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин); *б* – карбиды ($G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин);
в – $(\gamma-\gamma')$ -эвтектика и пора ($G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 1$ мм/мин); *г* – карбиды ($G \approx 100^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 1$ мм/мин);
д – $(\gamma-\gamma')$ -эвтектика ($G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин); *е* – карбиды ($G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$, $R = 5$ мм/мин)

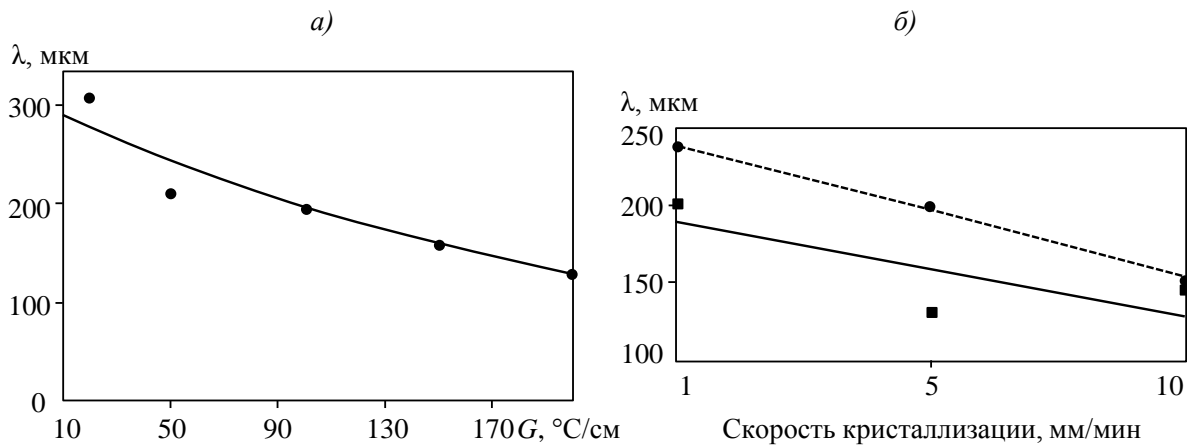


Рис. 4. Зависимость параметра междендритного расстояния λ от температурного градиента G (а) и от скорости кристаллизации (б) при температурном градиенте ~ 100 (- - -) и ~ 200 °C/см (—)

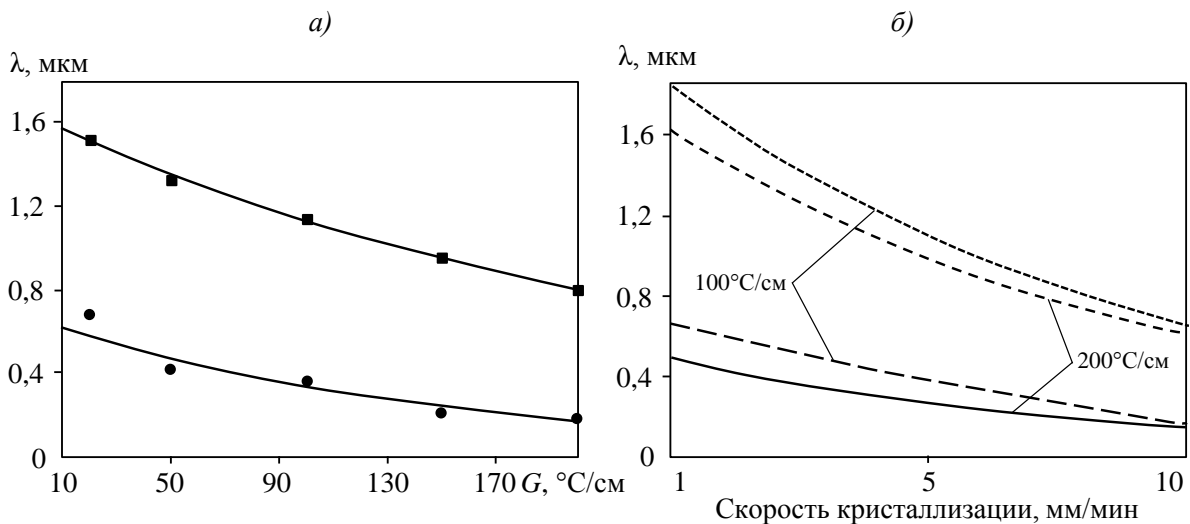


Рис. 5. Зависимость размера γ' -фазы в осях (●) и межосном пространстве (■) дендрита от значений температурного градиента G (а) и от скорости кристаллизации (б) при температурном градиенте ~ 100 и ~ 200 °C/см

Установлено, что размер частиц γ - γ' эвтектических выделений (см. рис. 3 а, в, д) в междендритных областях также зависит от условий кристаллизации. Повышение температурного градиента в диапазоне от $G \approx 20$ °C/см до $G \approx 200$ °C/см (при $R = 5$ мм/мин) содействует уменьшению их размера с ~ 19 до ~ 7 мкм (рис. 6, а). Рост скорости кристаллизации с $R \approx 1$ мм/мин до $R \approx 10$ мм/мин (при $G \approx 100$ °C/см и $G \approx 200$ °C/см соответственно) также уменьшает размер выделений частиц (γ - γ')-эвтектики (рис. 6, б).

Литейные поры наблюдаются в междендритных областях вблизи выделений частиц (γ - γ')-эвтектических фаз (см. рис. 3, а, в), и повышение температурного градиента в указанном выше диапазоне способствует уменьшению их размера (с ~ 16 до ~ 5 мкм), а

также уменьшению их объемной доли – с $V \approx 0,12\%$ до $V \approx 0,013\%$ (рис. 7, а). Размер пор и их объемная доля (рис. 7, б) также уменьшаются и с ростом скорости кристаллизации.

Выделения карбидной фазы концентрируются в междендритном пространстве в виде скоплений пластин (см. рис. 3), называемых «китайскими иероглифами» [1]. Можно заметить, что с повышением температурного градиента и скорости кристаллизации размер пластин и их толщина уменьшаются (см. рис. 3, б, з, е).

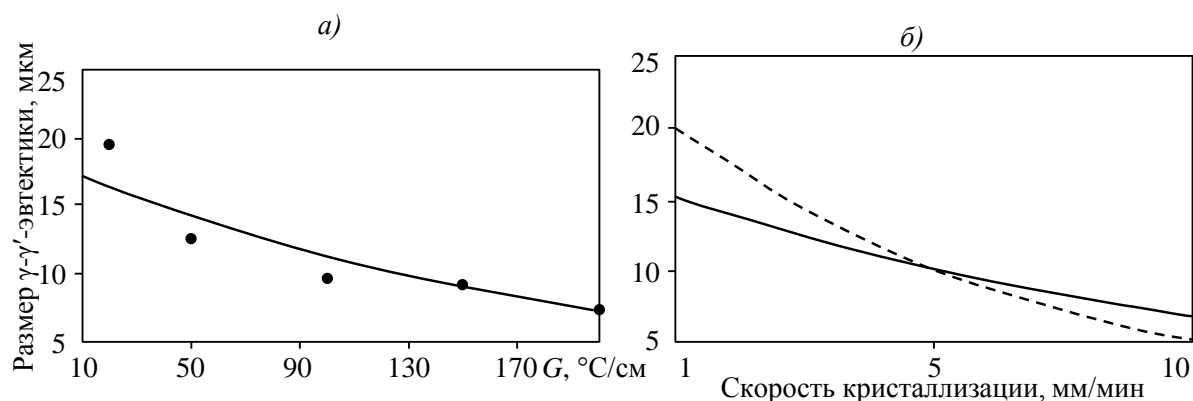


Рис. 6. Зависимость размера частиц ($\gamma-\gamma'$)-эвтектики от значений температурного градиента G (а) и от скорости кристаллизации (б) при температурном градиенте ~ 100 (- - -) и $\sim 200^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (—)

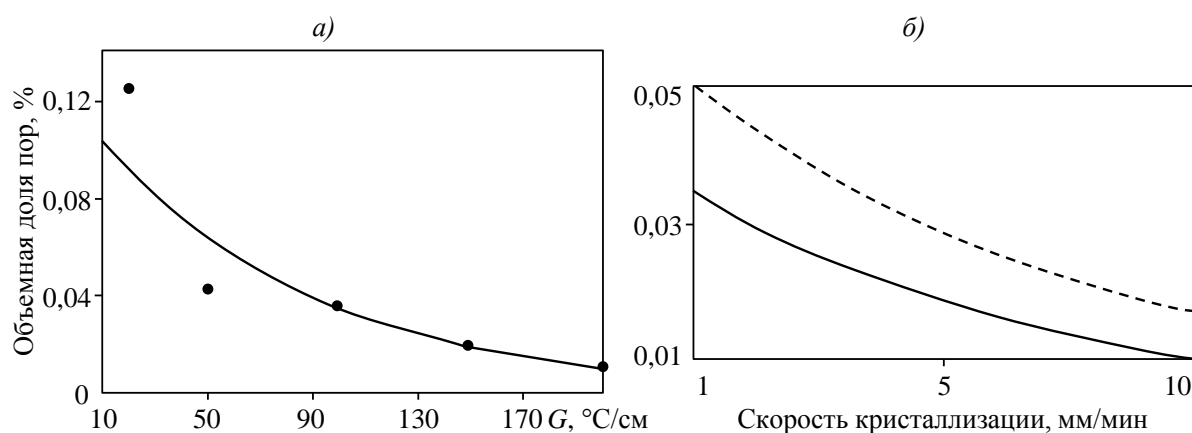


Рис. 7. Зависимость объемной доли пор от значений температурного градиента G (а) и от скорости кристаллизации (б) при температурном градиенте ~ 100 (- - -) и $\sim 200^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (—)

С помощью микрорентгеноспектрального анализа оценивали коэффициенты дендритной ликвации в зависимости от условий кристаллизации. В результате установлено, что оси дендритов обогащены W, Re, межосные области содержат преимущественно Al, Mo, Cr, Ta (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость коэффициента ликвации элементов сплава ВЖМЗ с монокристаллической структурой от температурного градиента

G, °C/см	Коэффициент ликвации элементов						
	Al	Cr	Co	Mo	Ta	W	Re
20	0,8	0,9	1,1	0,7	0,7	2,1	2,1
50	0,8	0,9	1,1	0,7	0,7	1,8	1,9
100	0,8	0,7	1,0	0,7	0,8	1,9	1,9
150	0,8	0,8	1,1	0,8	0,8	1,8	1,8
200	0,9	0,8	1,0	0,8	0,8	1,8	1,8

Примечание. Коэффициент ликвации элементов определяли по формуле $K_d = C_{o,d}/C_{m,d}$, где $C_{o,d}$ и $C_{m,d}$ – концентрация легирующего элемента в оси дендрита и межосном пространстве соответственно.

Повышение температурного градиента уменьшает неоднородность химического состава, вызванную дендритной ликвацией, что особенно важно для современных монокристаллических сплавов с повышенным содержанием тугоплавких элементов (W, Re), имеющих малую диффузионную подвижность в никелевом твердом растворе. Можно заметить, что коэффициент дендритной ликвации тугоплавких элементов (W и Re) с повышением температурного градиента уменьшается с 2,1 (при $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{см}$) до 1,7 (при $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{см}$). Частицы (γ - γ')-эвтектики в большей степени обогащены Al и Ta.

Оценка химического состава карбидной фазы, проведенная методом микрорентгеноспектрального анализа (табл. 2), показала, что карбидная фаза наряду с углеродом содержит значительное количество тантала, это позволяет предположить, что эта фаза – на основе карбида тантала.

Таблица 2

Локальный химический анализ состава карбидной фазы в зависимости от температурного градиента

G, °C/см	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Cr	Co	Si	Nb	Mo	Ta	W	Re	C
20	0,1	1,6	1,6	10,5	14,9	2,1	53,3	5,4	He	10,5
100	н/о	0,8	1,2	6,2	19,6	1,5	61,6	2,2	обнаружено	7,3
200	н/о	1,0	1,2	6,2	20,0	2,0	61,6	1,9		6,1

Механические свойства жаропрочных никелевых монокристаллических сплавов во многом определяются их химическим составом и характером структуры, в том числе размером дендритных составляющих, формой и размером частиц упрочняющей γ' -фазы, количеством (γ - γ')-эвтектики, размером и количеством пор. В настоящее время для выравнивания химического состава монокристаллических сплавов за счет уменьшения дендритной ликвации, растворения частиц (γ - γ')-эвтектики, а также оптимизации размера и формы частиц упрочняющей γ' -фазы – используют длительную по времени высокотемпе-

ратурную гомогенизацию (при температуре $\sim 1300^\circ\text{C}$, продолжительности >40 ч) с последующим многостадийным старением и охлаждением с заданной скоростью. Растворение частиц (γ - γ')-эвтектики сопровождается значительным увеличением объемной доли и количества пор, и для их уменьшения дополнительно используют дорогостоящую и трудоемкую технологию газостатического прессования (ГИП).

Результаты оценки кратковременной (при температуре 20°C) и длительной прочности (времени до разрушения при 1100°C и нагрузке $\sigma=120$ МПа), проведенной на моно-

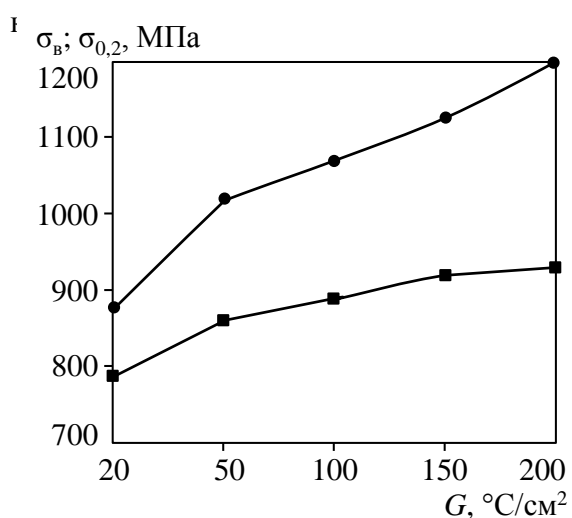


Рис. 8. Кратковременные свойства (средние значения при температуре 20°C) образцов из сплава ВЖМ-3 в зависимости от температурного градиента G

литом состоянии, приведены в на рис. 8 и 9.

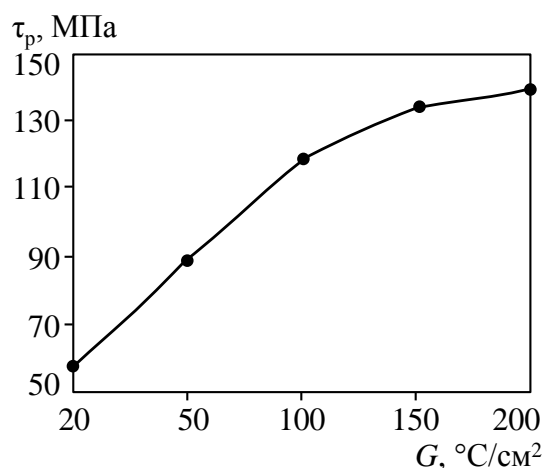


Рис. 9. Длительная прочность τ_p (средние значения при температуре 1100°C) образцов из сплава ВЖМ3 в зависимости от температурного градиента G

Результаты испытаний свидетельствуют, что при повышении температурного градиента отмечается рост кратковременной прочности, а также времени до разрушения при испытании на жаропрочность.

Результаты проведенных исследований показывают, что, управляя температурным градиентом и скоростью направленной кристаллизации, можно сформировать литую монокристаллическую структуру с наиболее оптимальным размером фазовых составляющих, меньшей дендритной ликвацией и пористостью, что обеспечит более высокий уровень свойств жаропрочных сплавов.

Обсуждение и заключения

Установлено, что с ростом температурного градиента (с $G \approx 20^\circ\text{C}/\text{cm}$ до $G \approx 200^\circ\text{C}/\text{cm}$) формируется более однородная структура с меньшими междендритным расстоянием (в ~ 2 раза) и размером упрочняющей γ' -фазы в осях и междендритном про-

странстве (в ~2 раза), меньшим размером выделений частиц (γ - γ')-эвтектики (~2 раза), меньшими размерами и объемными долями литейных пор (в ~10 раз). Аналогичные результаты получили и при росте скорости кристаллизации с $R=1$ мм/мин до $R=10$ мм/мин.

Повышение температурного градиента содействует росту значений кратковременных свойств и увеличению времени до разрушения при испытании на жаропрочность образцов из сплава ВЖМЗ в литом состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука. 2006. 632 с.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин /В кн. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. С. 98–115.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
5. Versnyder F.F., Guard R.W. Directional Grain Structure for High Temperature Strength //Trans. ASM. 1960. V. 52. P. 485–493.
6. Курц В., Зам П.Р. Направленная кристаллизация эвтектических материалов. М.: Металлургия. 1980. 272 с.
7. 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.
8. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
9. 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. №4. С. 31–36.

10. 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.
11. 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.
12. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. №2148099 Рос. Федерация; опубл. 18.01.99 Бюл. 2000. №12.
13. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова 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.

REFERENCES LIST

1. Litye lopatki gazoturbinnih dvigatelej: splavy, tehnologii, pokrytija [Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coverings] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. 2-e izd. M.: Nauka. 2006. 632 s.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). S. 3–33.
3. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L. Komp'yuternoe konstruirovanie zharoprochnogo nikellevogo splava IV pokolenija dlja monokristallicheskih lopatok gazovyh turbin [Computer designing of heat resisting nickel alloy IV of generation for single-crystal blades of gas turbines] /V kn. Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina. M.: Nauka. 2006. S. 98–115.
4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Nickel foundry hot strength alloys of new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 36–52.
5. Versnyder F.F., Guard R.W. Directional Grain Structure for High Temperature Strength //Trans. ASM. 1960. V. 52. P. 485–493.

6. Kurc V., Zam P.R. Napravlenaja kristalizacija jevtekticheskikh materialov [The directed crystallization of evtektichesky materials]. M.: Metallurgija. 1980. 272 s.
7. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N., Morozova G.I. Vlijanie vysokogradientnoj napravlennoj kristalizacii na strukturu i fazovyj sostav zharoprochnogo splava tipa Rene N5 [Influence of the high-gradient directed crystallization on structure and phase composition of hot strength alloy of the Rene N5 type] //MiTOM. 1999. №2. S. 15–18.
8. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Napravlenaja kristalizacija zharoprochnyh splavov s povyshennym temperaturnym gradientom [The directed crystallization of hot strength alloys with the raised temperature gradient] //MiTOM. 2002. №7. S. 20–23.
9. 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 commercial UVNS-6 high-gradient unit for receiving blades and other details of GTD from cast heat resisting and intermetallidny alloys with single-crystal structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №4. S. 31–36.
10. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N., Surova V.A., Echin A.B. Vlijanie vysokogradientnoj napravlennoj kristalizacii na strukturu i svojstva renijsoderzhashhego monokristallicheskogo splava [Influence of the high-gradient directed crystallization on structure and property of reniysoderzhashchy single-crystal alloy] //MiTOM. 2006. №8. S. 33–35.
11. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov $\langle 001 \rangle$ vysokorenievogo nikeljevogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristalizacii [Features of structure and heat resisting properties of monocrystals of $\langle 001 \rangle$ high-rhenium nickel hot strength alloys received in the conditions of high-gradient directed crystallization] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
12. Zharoprochnyj splav na osnove nikelja [Hot strength alloy on the basis of nickel]: pat. №2148099 Ros. Federacija; opubl. 18.01.99 Bjul. 2000. №12.
13. Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskij A.R. Vlijanie temperaturnogo gradienta na fronte rosta na strukturu zharoprochnogo splava pri napravlennoj kristalizacii [Influence of temperature gradient at the front growth on hot strength alloy structure at the directed crystallization] //Litejshhik Rossii. 2014. №5. S. 24–27.