

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-35-40

ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РАБОЧИХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ЖС32 С ПЕРСПЕКТИВНОЙ СХЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

© Евгений Викторович Колядов, Лидия Ивановна Рассохина,
Елена Михайловна Висик, Виктор Владимирович Герасимов,
Елена Владимировна Филонова

Всероссийский НИИ авиационных материалов (ВИАМ), Москва, Россия; e-mail: admin@viam.ru

Статья поступила 10 января 2018 г.

Представлены результаты исследования монокристаллических рабочих турбинных лопаток с перспективной схемой охлаждения, отлитых из жаропрочного сплава ЖС32 с использованием керамических стержней с высокотемпературными спекающими добавками и дополнительной пропиткой раствором лака. Доработана программа кристаллизации лопаток с монокристаллической структурой на установке ВИП-НК. Проведено сравнение режимов работы обновленной программы и серийной технологии. Получена опытная партия отливок в производственных условиях машиностроительного предприятия (выход годного по монокристаллической структуре литья — 94 %). Отливки лопаток исследовали методами рентгеноструктурного, рентгенографического и ультразвукового контроля. Проведен количественный металлографический анализ на оптическом комплексе, оценены междендритное расстояние между осями дендритов первого порядка (λ_1) сплава и объемная доля микропор в сечении пера и замка отливок. Полученные данные исследования макро- и микроструктуры методом растровой электронной микроскопии показали, что структура типична для сплава ЖС32 в литом состоянии и хорошо сформирована в элементах внутренней полости монокристаллических отливок.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы; монокристаллы; направленная кристаллизация; керамический стержень; макротравление; малоугловые границы; разориентация блоков структуры.

STUDY OF SINGLE CRYSTAL TURBINE BLADES MADE OF ZhS32 ALLOY WITH A PROMISING SCHEME OF COOLING

© Evgeny V. Kolyadov, Lidiya I. Rassohina, Elena M. Visik,
Victor V. Gerasimov, Elena V. Filonova

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM), Moscow, Russia; e-mail: admin@viam.ru

Submitted January 10, 2018.

The results of studying single-crystal turbine blades with a promising scheme of cooling, cast from a heat-resistant ZhS32 alloy using ceramic rods with high-temperature sintering additives and additional impregnation with a varnish solution are presented. The program of crystallizing blades with a single-crystal structure is improved on a VIP-NK installation. A comparison of the operation modes of the updated program and serial technology is presented. A pilot batch of blade castings is obtained under production conditions of a machine-building enterprise with an output suitable in single-crystal structure of about 94%. Blade castings are studied using X-ray diffraction, X-ray and ultrasound methods. Quantitative metallographic analysis is carried out on an optical complex to determine spacing between axes of the first order dendrites (λ_1) of the alloy and the volume fraction of the micropores in the cross section of the pen and casting lock. The results of scanning electron microscopy study of macro- and microstructure of the blade castings with a promising cooling scheme showed that the structure is typical for ZhS32 alloy in the cast state and is well formed in the elements of the inner cavity of monocrystalline blades.

Keywords: refractory nickel superalloys; single crystals; directional crystallization; high-temperature nickel alloys; ceramic rod; single crystals; macro-etching; micro-etching; large-angle boundaries; small-angle boundaries; disordering of structural blocks.

Температура газа на входе в турбину перспективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) может быть увеличена за счет повышения жаропрочности никелевых сплавов [1 – 3] рабочих лопаток с монокристаллической структурой [4 – 5] и совершенствования схем воздушного охлаждения их внутренней полости [11].

В процессе работы температура материала лопаток горячего тракта современных ГТД может достигать 1400 – 1500, лопаток с монокристаллической структурой — 1700 К. Жаропрочные никелевые сплавы четвертого и пятого поколений для монокристаллического литья (ВЖМ4, ВЖМ6, ВЖМ8), легированные рением и рутением, превосходят по жаропрочности серийные сплавы (ЖС26, ЖС32, ЖС36) на 50 – 100 °С [7 – 11]. Однако задача эффективного воздушного охлаждения лопаток при снижении расхода охлаждающего воздуха чрезвычайно актуальна.

Для повышения эффективности конвективно-пленочного охлаждения и улучшения теплоотдачи внутренней полости лопатки необходимо использовать такие элементы, как мелкие ребра, турбулизирующие штырьки и др., что на практике обеспечивается новой конструкцией стержня, оформляющего внутреннюю полость, совершенствованием технологии его изготовления и фиксации в модели изделия, а также отработкой технологических режимов монокристаллического литья [11 – 16].

Цель работы — исследование литых турбинных лопаток с монокристаллической структурой из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с новой перспективной схемой охлаждения внутренней полости.

Партию керамических стержней для литья рабочих лопаток с новой схемой конвективно-пленочного охлаждения (КПО) изготовили из двух стержневых масс опытных составов с высокотемпературными спекающими добавками мар-

шалита и пропиткой раствором лака КО-85, поскольку основная причина низкого выхода годных отливок лопаток с КПО — повышенный брак стержней из серийных керамических масс [16]. Для снижения риска выхода стержня из строя в момент заливки керамической формы расплавом на одной части восковых моделей стержень фиксировали «жеребейкой» из платино-родиевого сплава (по серийной технологии), на другой части в собранных блоках «жеребейки» не устанавливали.

Для уменьшения гидродинамического давления расплава на керамический стержень в процессе заливки модели собирали в литейный блок с Т-образным каналом-питателем для каждой двух моделей лопаток (рис. 1). Керамические литейные блоки изготавливали по серийному процессу на основе керамической суспензии смеси порошков электрокорунда с прочностью керамической формы на образцах-свидетелях после проковки $\sigma_b = 140 - 300$ МПа.

Отливку монокристаллических рабочих лопаток с КПО из жаропрочного сплава ЖС32 с заданной кристаллографической ориентацией (КГО) [001] проводили на установке ВИП-НК для направленной кристаллизации с охлаждением керамических форм в жидкометаллическом кристаллизаторе (алюминии) при градиенте температур на фронте кристаллизации сплава $G = 60 - 80$ град/см.

Для получения монокристаллической структуры заданной аксиальной ориентации использовали монокристаллические затравки с отклонением от направления [001] не более 3° из сплава Ni – W с температурой плавления на ~160 °С выше температуры солидуса жаропрочного сплава. Затравки устанавливали в керамические лопаточные формы перед плавкой, затем два блока керамических форм с затравками на специальной подвеске помещали в печь подогрева форм (ППФ) литейной установки.

Доработанная программа кристаллизации лопаток для установки ВИП-НК, в отличие от серийного процесса, включала измененные режимы охлаждения отливок по окончании перемещения в жидкометаллический охладитель (регулируемое охлаждение со скоростями 12 — для верхнего и 19 °С/мин — для нижнего нагревателей до температур 1250 и 1100 °С соответственно). Провели две заливки сплава ЖС32 в лопаточные блоки (по два блока в плавке) с переменной скоростью перемещения формы из зоны нагрева в жидкометаллический охладитель (с 8 — от начала перемещения формы до 5 мм/мин — при кристаллизации полки и замка). Также уменьшили разницу температур на форме по высоте в ППФ, увеличили глубину погружения формы в охлади-

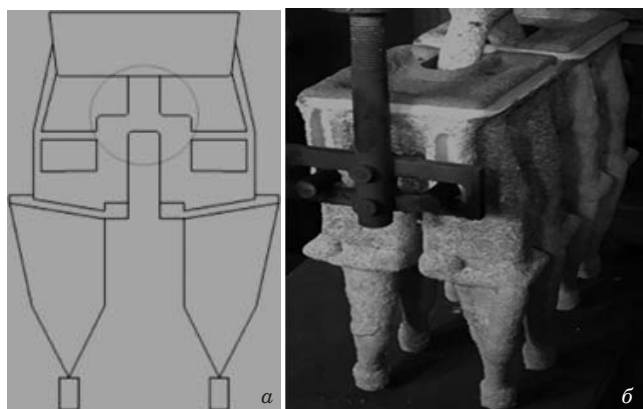


Рис. 1. Схема модельного блока (а) и керамические блоки лопаток с КПО (б)

Таблица 1. Температурно-скоростные режимы плавок лопаток на установке ВИП-НК

Параметр	Доработанная программа кристаллизации (плавки № 1, 2)	Серийная технология
T нагревателей, °С	1560 – 1600	1530 – 1630
T перегрева расплава в тигле, °С	1650 ± 10	1600 ± 10
T заливки расплава, °С	1580 ± 10	1550 ± 10
Скорость кристаллизации сплава $V_{кр}$, мм/мин	8 – 5	8,5 – 11,5
Исходное положение формы перед заливкой	15 мм выше среза нижнего нагревателя	± 10 мм от среза нижнего нагревателя
Глубина погружения форм лопаток	до середины замка	до полки

Таблица 2. Результаты анализа макроструктуры, рентгеноструктурного, рентгенографического и ультразвукового контроля толщин стенок и отклонения КГО монокристаллических отливок лопаток

№ п/п	Структура	Контроль		
		Рентгеноструктурный (отклонение оси лопатки от КГО [001], град)	Рентгенографический	Ультразвуковой (толщин стенок)
1	моно	5	годная	годная
2	2 зерна	—	брак по структуре	0,5 (по ТП 0,60 – 1,05)
3	моно	5	годная	0,5 (по ТП 0,60 – 1,05)
4	моно	5	годная	соответствует ТП
5	моно	9	годная	соответствует ТП
6	моно	10	годная	соответствует ТП
7	моно	3	годная	соответствует ТП
8	моно	4	годная	соответствует ТП
9	моно	7	годная	соответствует ТП
10	моно	7	слом полки в модели	—
11	моно	2	годная	соответствует ТП
12	моно	4	выход стержня	—
13	моно	2	выход стержня	—
14	моно	5	выход стержня	—
15	моно	8	годная	соответствует ТП
16	моно	9	годная	0,5 (по ТП 0,60 – 1,05)

тель — до середины замка. В табл. 1 представлены режимы доработанной программы кристаллизации лопаток, а также серийной технологии.

Контроль макроструктуры отливок, полученных после травления (рис. 2), показал, что выход годного литья составляет 94 %.

Кристаллографическую ориентацию монокристаллических лопаток исследовали методом рентгеноструктурного анализа на стартовых конусах, предварительно отрезанных от каждого изделия в характеристическом излучении $\text{CuK}\alpha_1$ на автоматизированной установке типа «ДРОН». Установили, что отливки имеют монокристаллическую структуру с отклонением менее 10° от заданной КГО [001], что соответствует принятым техническим требованиям.

В табл. 2 приведены данные рентгеноструктурного анализа опытной партии монокристаллических отливок лопаток, полученных на уста-

Таблица 3. Результаты количественного металлографического анализа отливок лопаток с КПО

Отливка (см. табл. 2)	№ плавки	Междендритное расстояние между осями первого порядка λ_1 , мкм	Объемная доля микропор, %
№ 4 (перо)	1	260	0,02
№ 4 (замок)	1	350	0,35
№ 4 (полка)	1	370	0,34
№ 9 (перо)	2	230	0,09
№ 9 (полка)	2	250	0,31
№ 9 (замок)	2	320	0,29

новке ВИП-НК. Видно, что скорректированные температурно-скоростные режимы направленной кристаллизации, конструкция лопаточных блоков обеспечивают получение монокристалли-

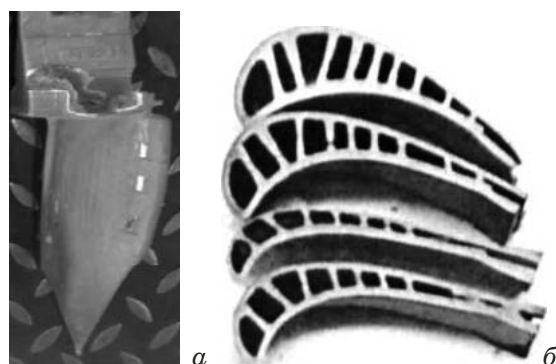


Рис. 2. Отливка рабочей лопатки (а), макрошлифы поперечного сечения профиля пера лопатки после удаления стержня (б)

ческой структуры заданной КГО [001] в отливках рабочих лопаток, включая полки и замки.

После удаления керамики из внутренней полости лопаток отливки контролировали методом рентгеновской дефектоскопии. Все лопатки оказались годными, качество поверхности соответствовало нормам допустимых дефектов. У трех образцов (из 16) выявили дефект «выход стержня» (у двух — на корыто лопатки со стороны входной кромки, у третьего — на спинку).

После рентгенографического исследования выход годного литья составил 75 % от числа залитых лопаток.

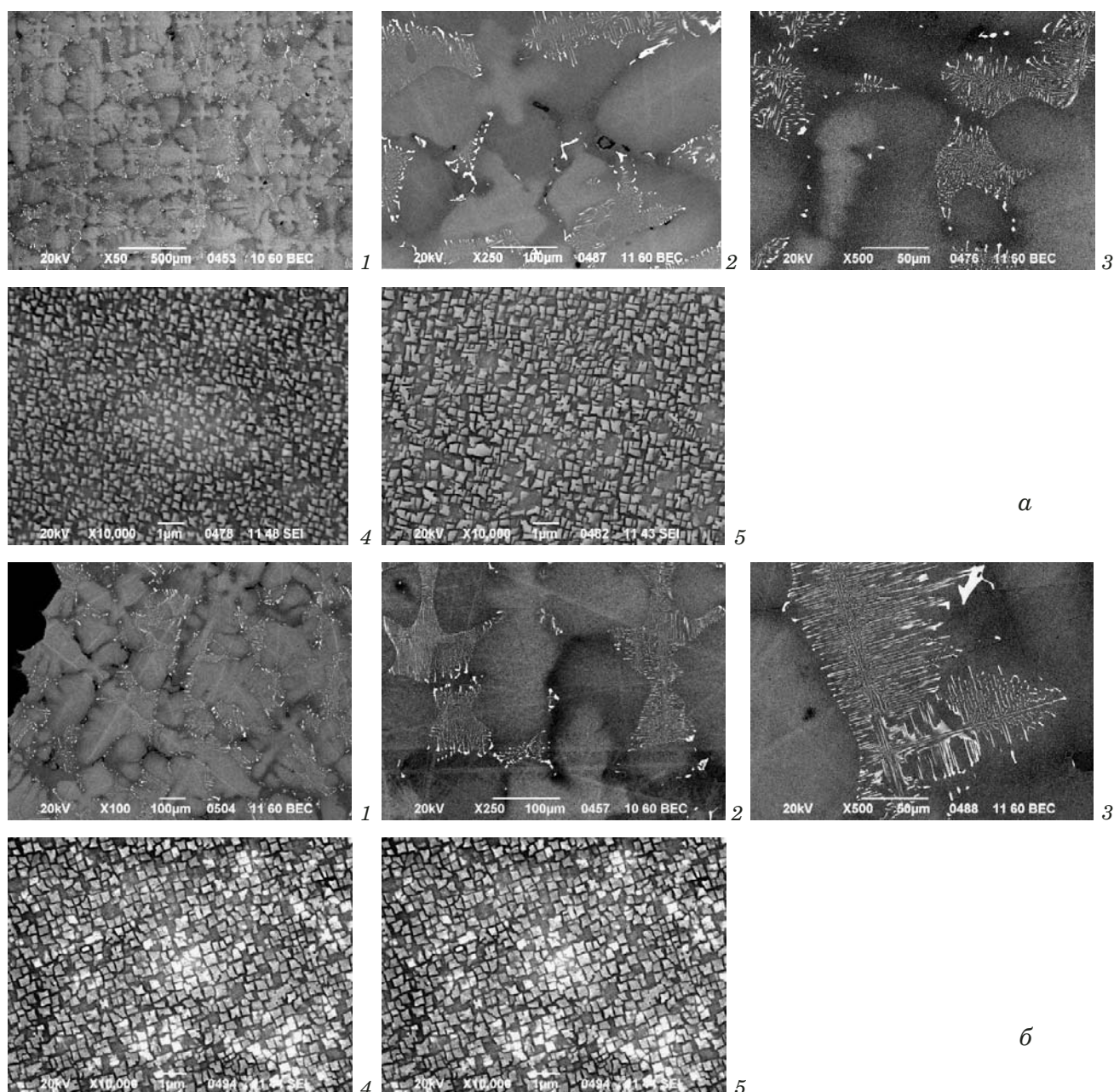


Рис. 3. Микроструктуры пера (плавка № 1) (а) и замка лопатки (плавка № 2) (б): 1 — ячейисто-дендритная структура; 2, 3 — эвтектическая γ' -фаза и карбидная эвтектика в междендритных областях; 4, 5 — морфология частиц γ' -фазы в осях дендритов и на междендритных участках

Провели также ультразвуковой анализ толщин стенок отливок (см. табл. 2) на соответствие техпроцессу (ТП). По его результатам четыре отливки забраковали.

Отметим, что пропитка стержней раствором лака КО-85 в этилцеллозолье позволила снизить процент брака по короблению стержней в процессе заливки и получить годные отливки без использования «жеребеек».

Микроструктуру исследовали на вырезанных из отливок микрошлифах. Для количественного металлографического анализа использовали оптический комплекс Leica (табл. 3).

Исследования методом растровой электронной микроскопии проводили с помощью электронного микроскопа JSM6490-LV (рис. 3). Получили, что в литом состоянии микроструктура монокристаллов сплава ЖС32 в отливках рабочих лопаток имеет дендритно-ячеистое строение и характеризуется химической неоднородностью в пределах дендритной ячейки, обусловленной микроликвацией легирующих элементов в процессе направленной кристаллизации, а также наличием в междендритных областях неравно-весных выделений эвтектики $\gamma + \gamma'$ и литейной (первичной) микропористости [17]. В микроструктуре наблюдается размерная и морфологическая неоднородности частиц упрочняющей γ' -фазы (в осях дендритов фаза значительно мельче, чем на междендритных участках). Около эвтектической γ' -фазы присутствуют литейные микропоры, размер которых в замке составляет до 30 мкм. Наличие рыхлоты в полках лопаток не обнаружили.

В результате этого уменьшаются размер литейных микропор в замковой части и их объемная доля, что положительно сказывается на свойствах изделий.

Таким образом, проведенные исследования отливок рабочих лопаток из сплава ЖС32 с новой перспективной схемой охлаждения внутренней полости показали, что отливка лопаток по доработанной программе кристаллизации на литейной установке ВИП-НК обеспечивает получение изделий с монокристаллической структурой, хорошо сформированной в элементах внутренней полости (отклонение не более 10° от заданной аксиальной ориентации [001]), и выходом годного по макроструктуре литья $\geq 90\%$. При этом микроструктура типична для сплава ЖС32 в литом состоянии (более дисперсная в пере, чем в замковой части, объемная доля микропористости — в пределах технических требований на лопатки).

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. С. 3 – 33.
2. Каблов Е. Н., Светлов И. Л., Петрушин Н. В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. I / Материаловедение. 1997. № 4. С. 32 – 39.
3. Miller J. D., Pollock T. M. Development and Application of Optimization Protocol For Directional Solidification: Integration Fundamental Theory, Experimentation and Modeling Tools / TMS: (Minerals, Metals & Materials Society). 2012. P. 653 – 662.
4. Betz U., Jarczyk G., Seserko P. Economic Benefit of LMC Process for the Production of Turbine Components / 4th ALD Symposium. China. Sanya Hainan-Island. 2005.
5. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин / Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. — М.: Наука, 2006. С. 98 – 115.
6. Каблов Е. Н., Ломберг Б. С., Оспенникова О. Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения / Крылья Родины. 2012. № 3 – 4. С. 34 – 38.
7. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2(35). С. 14 – 25.
8. Каблов Е. Н., Светлов И. Л., Петрушин Н. В. Никелевые жаропрочные сплавы, легированные рутением / Авиационные материалы и технологии. 2004. № 1. С. 80 – 90.
9. Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Висик Е. М., Рассохина Л. И., Тимофеева О. Б. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности / Литейное производство. 2012. № 6. С. 5 – 11.
10. Шарова Н. А., Тихомирова Е. А., Барабаш А. Л., Живушкин А. А., Брауэр В. Э. К вопросу о выборе новых жаропрочных никелевых сплавов для перспективных авиационных ГТД / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19). С. 249 – 255.
11. Скибин В. А., Солонин В. И. Авиационное двигателестроение. Дорога в завтрашний день / Двигатель. 2007. № 5(53). С. 1 – 4.
12. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). — М.: МИСИС, 2006. — 632 с.
13. Герасимов В. В., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава / Труды ВИАМ. 2015. № 3. Ст. 01. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.04.2017).
14. Висик Е. М., Тихомирова Е. А., Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Герасимов В. В., Живушкин А. А. Технологическое опробование нового жаропрочного сплава с низкой плотностью при литье турбинных рабочих монокристаллических лопаток / Металлург. 2017. № 2. С. 34 – 40.
15. Каблов Е. Н., Герасимов В. В., Висик Е. М., Демонис И. М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД / Труды ВИАМ. 2013. № 3. Ст. 01. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.04.2017).
16. Оспенникова О. Г., Рассохина Л. И., Битюцкая О. Н., Гамазина М. В. Оптимизация технологии изготовления керамических стержней для улучшения качества литых лопаток ГТД / Новости материаловедения. Наука и технологии. 2017. № 3 – 4. С. 4 – 7.
17. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толорая В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. — М.: Машиностроение, 1997. — 336 с.

REFERENCES

1. **Kablov E. N.** Innovative developments of FSUE "VIAM" of the SSC RF for the implementation of "Strategic Directions for the Development of Materials and Technologies for Their Processing until 2030" / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 1. P 3 – 33 [in Russian].
2. **Kablov E. N., Svetlov I. L., Petrushin N. V.** Nickel high-temperature alloys for casting blades with a directional and single-crystal structure. Part I / *Materialovedenie*. 1997. N 4. P 32 – 39 [in Russian].
3. **Miller J. D., Pollock T. M.** Development and Application of Optimization Protocol For Directional Solidification: Integration Fundamental Theory, Experimentation and Modeling Tools / TMS: (Minerals, Metals & Materials Society). 2012. P 653 – 662.
4. **Betz U., Jarczyk G., Seserko P.** Economic Benefit of LMC Process for the Production of Turbine Components / 4th ALD Symposium. China. Sanya Hainan-Island. 2005.
5. **Kablov E. N., Petrushin N. V., Svetlov I. L.** Computer Design of Heatproof Nickel Alloy IV Generation for Monocrystalline Blades of Gas Turbines / *Foundry superalloys. The S. T. Kishkin Effect*. — Moscow: Nauka, 2006. P. 98 – 115 [in Russian].
6. **Kablov E. N., Lomberg B. C., Ospennikova O. G.** Creation of modern heat-resistant materials and technologies of their production for aircraft engine building / *Kryl'ya Rodiny*. 2012. N 3 – 4. P 34 – 38 [in Russian].
7. **Kablov E. N., Ospennikova O. G., Petrushin N. V., Visik E. M.** A new-generation low-density single-crystal, heat-resistant nickel alloy / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 2(35). P 14 – 25 [in Russian].
8. **Kablov E. N., Svetlov I. L., Petrushin N. V.** Nickel high-temperature alloys doped with ruthenium / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2004. N 1. P 80 – 90 [in Russian].
9. **Petrushin N. V., Ospennikova O. G., Visik E. M., Rassokhina L. I., Timofeeva O. B.** High-temperature nickel alloys of low density / *Liteinoe Proizv.* 2012. N 6. P 5 – 11 [in Russian].
10. **Sharova N. A., Tikhomirova E. A., Barabash A. L., Zhivushkin A. A., Brauer V. E.** On the choice of new high-temperature nickel alloys for advanced aircraft GTE / *Vestn. Samar. Gos. Aërokosm. Univ.* 2009. N 3(19). P. 249 – 255 [in Russian].
11. **Skibin V. A., Solonin V. I.** Aircraft engine. The road to tomorrow / *Dvigatel'*. 2007. N 5(53). P. 1 – 4 [in Russian].
12. **Kablov E. N.** Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings). — Moscow: MISIS, 2006. — 632 p. [in Russian].
13. **Gerasimov V. V., Petrushin N. V., Visik E. M.** Improvement of composition and development of technology for casting single-crystal blades from a high-temperature intermetallic alloy / *Tr. VIAM*. 2015. N 3. Art. 01. <http://www.viam-works.ru> (accessed 10.04.2017).
14. **Visik E. M., Tikhomirova E. A., Petrushin N. V., Ospennikova O. G., Gerasimov V. V., Zhivushkin A. A.** Technological testing of a new high-temperature alloy with low density during casting of turbine working single-crystal blades / *Metallurg*. 2017. N 2. P 34 – 40.
15. **Kablov E. N., Gerasimov V. V., Visik E. M., Demonis I. M.** The Role of Directional Crystallization in Resource-Saving Technology for the Production of GTE Parts / *Tr. VIAM*. 2013. N 3. Art. 01. <http://www.viam-works.ru> (accessed 10.04.2017).
16. **Ospennikova O. G., Rassokhina L. I., Bityutskaya O. N., Gamazina M. V.** Optimization of manufacturing technology of ceramic rods to improve the quality of cast blades GTD / *Nov. Materialoved. Nauka Tekhnol.* 2017. N 3 – 4. P 4 – 7 [in Russian].
17. **Shalin R. A., Svetlov I. L., Kachanov E. B., Toloraya V. N., Gavrilin O. S.** Single crystals of nickel refractory alloys. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1997. — 336 p. [in Russian].