

УДК 669.018.44:669.245

*П.Г. Мин<sup>1</sup>, В.Е. Вадеев<sup>1</sup>, В.В. Крамер<sup>1</sup>***РАЗРАБОТКА НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖМ200 И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ЛИТЬЯ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18

*Во ФГУП «ВИАМ» разработаны новый жаропрочный никелевый сплав ВЖМ200 и технология его производства для литья рабочих лопаток с направленной (столбчатой) структурой перспективных газотурбинных двигателей. Представлены квоты его превосходства над зарубежным сплавом-аналогом DS200 Hf.*

*Сплав ВЖМ200 производства ФГУП «ВИАМ» по стабильности химического состава, содержанию вредных примесей, газов, неметаллических включений и механическим свойствам не уступает сплавам-аналогам DS200 Hf и MAR M200+Hf зарубежных производителей – фирм Cannon-Muskegon Corporation и HOWMET Ltd.*

**Ключевые слова:** *литейный жаропрочный сплав, направленная кристаллизация, структура, примеси, фазовая стабильность, длительная прочность, многоцикловая усталость.*

*P.G. Min<sup>1</sup>, V.E. Vadeev<sup>1</sup>, V.V. Kramer<sup>1</sup>***THE DEVELOPMENT OF THE NEW VZhM200 SUPERALLOY AND THE TECHNOLOGY OF ITS PRODUCTION FOR CASTING OF THE ADVANCED ENGINES' BLADES BY THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION**

*FSUE «VIAM» has developed a new nickel-based superalloy VZhM200 and its manufacturing technology for casting of turbine blades with directional (pillar-type) structure for advanced turbine engines. The advantages of the VZhM200 alloy over the DS200 Hf alloy are presented in the article.*

*The quality of VZhM200 alloy produced by FSUE «VIAM» meets the DS200 Hf, MAR M200+Hf alloys produced by Cannon-Muskegon Corporation and HOWMET Ltd in chemical composition, content of harmful and non-metal impurities, gases and mechanical properties.*

**Keywords:** *casting superalloy, directional solidification, structure, impurities, phase stability, stress rupture strength, high-cycle fatigue.*

<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

**Введение**

С целью обеспечения технологического суверенитета авиастроения Российской Федерации (РФ) и импортозамещения газотурбинного двигателя (ГТД) SaM146 Правительство РФ поставило задачу АО «ОДК» – к 2023 г. разработать отечественный перспективный двигатель ПД-8 для самолета Sukhoi Superjet 100 [1–3] и самолета-амфибии Бе-200 [4, 5]. При этом двигатель должен быть изготовлен из отечественных материалов, которые по стоимости и эксплуатационным характеристикам не должны уступать зарубежным материалам.

Литейный жаропрочный никелевый сплав DS200 Hf (фирма Snecma, Франция) [6] – аналог сплава MAR M200 + Hf (фирма Cannon-Muskegon Corporation, США) разработан в 1970–1980 гг., однако востребован и в настоящее время в качестве материала рабочих лопаток современных ГТД для самолетов ведущих мировых производителей – например, Airbus A320neo (Франция), Boeing 737MAX (США) и Comac C919 (КНР).

Опыт применения данного сплава моторостроительными предприятиями при литье методом направленной кристаллизации рабочих лопаток турбины низкого давления (ТНД) двигателей LEAP-1B (для самолетов Airbus A320 и A330) и SaM146 (силовой агрегат для лайнера Sukhoi Superjet 100) [7, 8] показал высокую технологическую и экономическую эффективность: технология литья лопаток обеспечивает высокий выход годного и за счет отсутствия в системе легирования дорогостоящих элементов (рений, рутения и тантала) стоимость сплава многократно меньше стоимости современных отечественных и зарубежных монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов – например, марок ВЖМ4, ВЖМ5, CMSX-4, CMSX-10 и др.

Задачей представленной работы являлась разработка нового жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 и технологии его производства с целью импортозамещения сплава DS200 Hf для литья рабочих лопаток перспективных ГТД, в том числе двигателя ПД-8.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### **Материалы и методы**

В качестве объекта исследования выбран отечественный литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖМ200 (табл. 1) [9] и зарубежные сплавы-аналоги марок DS200 Hf (фирмы HOWMET Ltd, Великобритания) и MAR M200 + Hf (фирмы Cannon-Muskegon Corporation, США).

*Таблица 1*

**Содержание легирующих элементов и микродобавок  
в литейном жаропрочном никелевом сплаве ВЖМ200 [9]**

Содержание элементов, % (по массе)													
Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	B	Zr	La	Ce	Ca
Основа	0,08– 0,14	8,0– 10,0	9,0– 11,0	11,5– 12,5	4,75– 5,25	1,75– 2,25	0,75– 1,25	1,5– 2,0	0,01– 0,02	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,005

Выплавку сплава ВЖМ200 проводили из свежих шихтовых материалов в промышленных вакуумных индукционных печах с емкостью тиглей 350 и 1000 кг. Для получения отливок с направленной структурой полученные литые прутковые заготовки после механической обработки переплавляли с заливкой в керамические блоки в плавно-заливочной установке типа ВИП-НК или УВНК-9 [10–12] с применением поликристаллических затравок с кристаллографической ориентацией (КГО) <001>. Отливки подвергали термической обработке, включающей закалку (гомогенизацию) и старение в камерных электропечах сопротивления ЭСКВЭ-3/16ГМ5 и Nabertherm LT 15/13, после чего изготавливали образцы для испытаний механических свойств.

Содержание легирующих элементов в сплаве определяли методами ИСР-эмиссионной спектроскопии на спектрометре POTIMA 8300 фирмы PerkinElmer и волнодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на установке S4 EXPLORER фирмы Bruker Support. Определение содержания серы, углерода, кислорода, азота проводили на газоанализаторах CS-600 и TC-600 фирмы Leco, остальных примесей – масс-спектрометрическим методом на установках iCAP Qc и Element GD фирмы Thermo Fisher Scientific.

Микроструктурные исследования проводили на оптическом микроскопе GX51 фирмы Olympus и растровом электронном микроскопе.

На термически обработанных образцах проводили испытания механических свойств: на растяжение – на машине Kappa 50 DS фирмы Zwick Roel, на длительную прочность – на машине ZST2/3-ВИЭТ фирмы Schenck, на многоцикловую усталость – на машине LFV-100 фирмы Schenck на базе  $10^7$  циклов при коэффициенте асимметрии  $R = -1$ .

### Результаты и обсуждение

За основу нового литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 взята система легирования зарубежных сплавов-аналогов MAR M200 + Hf и DS200 Hf. С целью снижения содержания вредных примесей и газов, а также повышения характеристик длительной прочности и стойкости сплава ВЖМ200 к высокотемпературной газовой коррозии в его состав включили небольшие строго ограниченные количества щелочно-земельного элемента кальция и редкоземельных элементов – лантана и церия. На состав разработанного сплава получен патент РФ [9].

Одним из критериев высокого качества сплава и обеспечения требуемого уровня его механических свойств является стабильность химического состава по основным легирующим элементам. Обеспечение высокой стабильности химического состава в узких интервалах легирования для данного сплава дополнительно осложняется наличием в системе легирования повышенного содержания гафния (1,5–2,0 % (по массе)) в сравнении с известными отечественными гафнийсодержащими сплавами марок ВКНА-1ВР (0,4–0,6 % (по массе) Hf), ЖС30 (0,3–1,2 % (по массе) Hf) и ЖС6Ф (1,0–1,5 % (по массе) Hf). Это связано с тем, что гафний является химически активным элементом и имеет повышенное сродство к кислороду, поэтому склонен к взаимодействию с керамикой плавильного тигля. Чем больше концентрация гафния в расплаве, тем интенсивнее происходит данное взаимодействие, что приводит к снижению его содержания в сплаве и дестабилизации химического состава.

Для возможности введения в расплав повышенного содержания гафния разработана гафний-никелевая лигатура собственного производства и установлены технологические параметры (порядок и температурно-временные режимы) ее введения при выплавке сплава ВЖМ200 в вакуумной индукционной печи.

Для обеспечения высокой стабильности химического состава сплава ВЖМ200 в заданных узких пределах легирования разработана технология корректировки химического состава во время плавки, которая заключается в проведении экспресс-анализа отобранной пробы с применением специально разработанного комплекта стандартных образцов данного сплава переменного состава и дошихтовки (при необходимости) элементов до оптимального (заданного) состава.

Отклонение содержания легирующих элементов от заданного химического состава сплава ВЖМ200 в сравнении со сплавами MAR M200 + Hf и DS200 Hf производства фирм Cannon-Muskegon Corporation и HOWMET Ltd соответственно представлено в табл. 2.

Таблица 2

**Отклонение от заданного состава в сплаве ВЖМ200  
и в зарубежных сплавах-аналогах DS200 Hf и MAR M200 + Hf**

Сплав	Изготовитель сплава	Масса плавки, кг	Отклонение от расчетного состава, % (по массе), по элементам								
			Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	C	B
ВЖМ200	ФГУП «ВИАМ» (Россия)	350	+0,17	+0,12	-0,08	-0,04	-0,01	-0,03	-0,02	+0,006	+0,001
		1000	+0,14	-0,02	-0,2	+0,05	-0,02	-0,01	0	-0,005	+0,002
DS200 Hf	HOWMET Ltd (Великобритания)	2000	-0,1	0	0,2	-0,12	-0,06	-0,05	-0,12	0	-0,001
MAR M200+Hf	Cannon-Muskegon Corporation (США)	6500	0	-0,19	-0,06	-0,11	0	0	+0,01	0	+0,001

Видно, что максимальное отклонение по содержанию легирующих элементов во всех трех сплавах не превышает  $\pm 0,2$  % (по массе). При этом в сплаве производства ФГУП «ВИАМ» отклонение от расчетного состава по хрому больше, чем в зарубежном металле (+0,17 против -0,1 % (по массе)), однако по другим элементам (кобальт, алюминий, гафний) стабильность химического состава отечественного сплава превосходит стабильность зарубежных сплавов ведущих мировых производителей жаропрочных никелевых сплавов.

При разработке технологии выплавки сплава ВЖМ200 были проанализированы имеющиеся на российском рынке шихтовые материалы, выбраны марки, допустимые к применению, и использованы последние достижения ФГУП «ВИАМ» в области рафинирования расплавов от вредных примесей при вакуумной индукционной плавке [13–17] – высокотемпературная обработка расплава и комплексное рафинирование от примесей щелочноземельными (кальцием) и редкоземельными (лантаном и церием) металлами с последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр. Это позволило обеспечить снижение содержания вредных примесей и газов в сплаве ВЖМ200 производства ФГУП «ВИАМ». В табл. 3 приведено содержание вредных примесей и газов в сплаве ВЖМ200 и в зарубежных сплавах-аналогах MAR M200 + Hf и DS200 Hf производства фирм Cannon-Muskegon Corporation и HOWMET Ltd соответственно.

Таблица 3

**Содержание вредных примесей и газов в сплаве ВЖМ200  
и в зарубежных сплавах-аналогах DS200 Hf и MAR M200 + Hf**

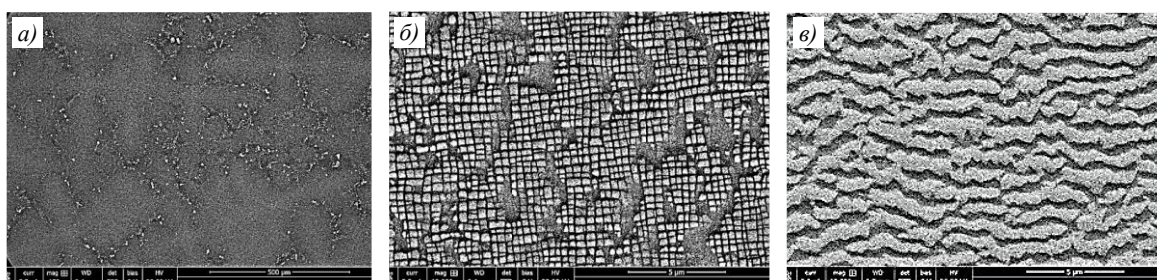
Сплав	Место выплавки сплава	Место проведения анализа	Количество плавков, шт.	Содержание примесей, ppm*													
				Fe	Mn	Si	Cu	P	S	Ag	Se	Pb	Bi	Te	Tl	O	N
ВЖМ200	ФГУП «ВИАМ» (Россия)		4	90–130	2–9	40–60	$\leq 2$	3–5	1–8	<0,9	<0,7	<0,1	<0,1	<0,2	<0,1	6–8	3–4
MAR M200+Hf	Cannon-Muskegon Corporation (США)	ФГУП «ВИАМ» (Россия)	1	140	1	42	2	5	6	<0,4	<0,2	<0,05	0,1	<0,1	<5	13	3
DS200 Hf	HOWMET Ltd (Великобритания)		6	100–1400	<100	<200	<100	<20	<10	<1	<1	<1	<0,1	<0,5	<0,2	–	–
Спецификации фирм Cannon-Muskegon Corporation и HOWMET Ltd (не более)				2500	2000	2000	1000	150	100	5	5	5	0,5	0,5	0,5	–	–

\* 1 ppm =  $10^{-4}$  % (по массе).

Видно, что низкие содержания вредных примесей и газов получены как в сплаве ВЖМ200, так и в зарубежных сплавах-аналогах MAR M200 + Hf и DS200 Hf. При этом содержание кислорода в сплаве MAR M200 + Hf составило 13 ppm, а в сплаве ВЖМ200 – в пределах 6–8 ppm, что практически в 2 раза меньше. Дополнительно следует отметить, что итоговый балл чистоты по неметаллическим включениям, рассчитанный методом количественной металлографии, для всех трех сплавов равен 0, что свидетельствует об отсутствии в них загрязнений и подтверждает соответствие качества сплава производства ФГУП «ВИАМ» зарубежным сплавам-аналогам.

При разработке технологии литья заготовок из сплава ВЖМ200 впервые в России на отечественном материале в установках направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем (типа УВНК-9А и ВИП-НК) применены поликристаллические (многозеренные) затравки, состоящие из ориентированных зерен с КГО <001>, что обеспечило получение заготовок с тонкостолбчатой направленной структурой, в которой каждое зерно имеет КГО, близкую к <001>.

После направленной кристаллизации и термической обработки сплав ВЖМ200 представляет собой дендритно-ячеистую структуру, состоящую из матричного  $\gamma$ -твердого раствора, упрочненного упорядоченными частицами интерметаллида  $\gamma'$ -фазы на основе  $Ni_3Al$  кубической формы и карбидами типа  $MeC$  преимущественно глобулярной морфологии (см. рисунок, а). Размер частиц  $\gamma'$ -фазы как в осях дендритов, так и в междендритных участках, выровнен и составляет  $\sim 0,4$  мкм (см. рисунок, б). Сплав ВЖМ200 обладает структурно-фазовой стабильностью: после испытаний на длительную прочность при температуре 900 °С на базе 1000 ч в его структуре отсутствуют выделения ТПУ-фаз (см. рисунок, в) [18–20].



Микроструктура (а –  $\times 150$ ; б, в –  $\times 10000$ ) сплава ВЖМ200 после полной термической обработки (а – общий вид; б – частицы  $\gamma'$ -фазы) и испытаний на длительную прочность при температуре 900 °С и напряжении 275 МПа ( $\tau = 980$  ч) (в)

Как показали результаты исследований, такая структура обеспечивает стабильно высокий уровень механических свойств: при проведении общей квалификации (паспортизации) сплава ВЖМ200 установлены квоты превосходства над зарубежным аналогом в соответствии с данными, приведенными в действующей нормативной документации на сплав DS200 Hf. Предположительно, нормы для сплава DS200 Hf установлены на основании результатов испытаний образцов, отлитых по методу Бриджмена на установках с медным охладителем, широко применяемых за рубежом. Сравнительные показатели свойств данных сплавов и квоты превосходства представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Сравнительные механические свойства (средние значения) при кратковременном растяжении сплавов ВЖМ200 и DS200 Hf**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств для сплава		Квоты превосходства, %
		ВЖМ200	DS200 Hf	
Предел прочности при растяжении, МПа	900	900	800	13
	1000	630	530	19
	1100	310	280	11
Предел текучести, МПа	900	790	715	10
	1000	465	425	9
	1100	225	235	–
Относительное удлинение, %	900	24	11	В 2,2 раза
	1000	27	15	В 1,8 раза
	1100	39	18	В 2,2 раза

Таблица 5

Сравнение длительной прочности и многоциклового усталости (средние значения) сплавов ВЖМ200 и DS200 Hf

Свойства	Продолжительность испытания, ч	Значения свойств для сплава		Квоты превосходства, %	
		ВЖМ200	DS200 Hf		
Длительная прочность, МПа, при температуре, °С	900	100	400	350	14
		500	315	275	15
		1000	275	250	10
	1000	100	200	180	11
		500	145	135	7
		1000	125	118	6
	1100	100	79	77	3
		500	55	49	12
		1000	47	40	18
МнЦУ: $\sigma_{max}$ , МПа, при температуре, °С	900	На базе	275	240	15
	1100	$N = 10^7$ циклов	100	85	18

Представленные в табл. 5 данные показывают, что разработанный сплав ВЖМ200 обладает в сравнении с зарубежным сплавом-аналогом марки DS200 Hf следующими основными преимуществами: по пределу длительной прочности при 900 °С на базе 500 ч – на 15 %, на базе 1000 ч – на 10 %, при 1000 °С на базе 500 ч – на 7 %, на базе 1000 ч – на 6 %, при 1100 °С на базе 500 ч – на 12 %, на базе 1000 ч – на 18 %; по пределу многоциклового усталости на базе  $10^7$  циклов при  $R_\sigma = -1$  на гладких образцах при 900 °С – на 15 %, при 1100 °С – на 18 %.

Опытные партии литых прутковых заготовок из сплава ВЖМ200, выплавленные в современных промышленных вакуумных индукционных печах с емкостью тиглей 350 и 1000 кг в количестве 1640 кг, поставлены на предприятия АО «ОДК» для опробования при литье рабочих лопаток ТНД перспективного двигателя ПД-8. Результаты входного контроля механических свойств сплава ВЖМ200 и зарубежного сплава-аналога DS200 Hf, заготовки которых отлиты в условиях заказчика с применением поликристаллических затравок с КГО <001>, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Механические свойства сплавов ВЖМ200 и DS200 Hf, отлитых с применением поликристаллических затравок с КГО <001>

Сплав	Место выплавки сплава	Место проведения литья и испытаний	Испытания на кратковременное растяжение при температуре 20 °С				Испытания на длительную прочность при температуре 980 °С и напряжении 220 МПа	
			Количество испытанных образцов	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$ , %	Количество испытанных образцов	Среднее время до разрушения, ч
				МПа				
ВЖМ200	ФГУП «ВИАМ»	ФГУП «ВИАМ»	5	1120; 1230	970; 990	10,5; 12,5	6	83; 116
		Входной контроль у заказчика	8	1085; 1230	909; 1000	7,4; 10,5	4	100; 113
DS200 Hf	HOWMET Ltd	Входной контроль у заказчика	12	1042; 1135	921; 950	9,8; 13	9	102; 110

Примечание. Приведены минимальное и среднее значения в соответствии с количеством испытанных образцов.

Видно, что сплав ВЖМ200 производства ФГУП «ВИАМ» не уступает сплаву DS200 Hf производства фирмы HOWMET Ltd, отлитому по аналогичной технологии: средние значения пределов прочности и текучести, относительного удлинения при комнатной температуре и времени до разрушения при испытании на ползучесть при температуре 980 °С и напряжении 220 МПа сплава DS200 Hf, испытанного у заказчика, составляют 1135 и 950 МПа, 13 % и 110 ч соответственно, а для сплава ВЖМ200, испытанного в условиях ФГУП «ВИАМ»: 1230 и 990 МПа, 12,5 % и 116 ч, в условиях заказчика: 1230 и 1000 МПа, 10,5 % и 113 ч соответственно.

Во ФГУП «ВИАМ» внедрена технология производства сплава ВЖМ200 на научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок из жаропрочных сплавов, оснащенный самым современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием. В настоящее время производственная мощность данного участка составляет 400 тонн в год, что позволит обеспечить потребности моторостроительных предприятий новым высококачественным жаропрочным никелевым сплавом.

### Заключения

С целью импортозамещения сплава DS200 Hf во ФГУП «ВИАМ» разработаны сплав ВЖМ200 и технология его производства для литья рабочих лопаток с направленной (столбчатой) структурой перспективных ГТД, в том числе двигателя ПД-8.

Сплав ВЖМ200 является структурно-фазовостабильным и обладает преимуществами перед зарубежным сплавом-аналогом DS200 Hf при температурах 900–1100 °С: по пределу длительной прочности на базах 500 и 1000 ч – на 6–8 %, по пределу многоциклового усталости на базе  $10^7$  циклов – на 15–18 %.

По стабильности химического состава, содержанию вредных примесей, газов, неметаллических включений и механическим свойствам сплав ВЖМ200 не уступает сплавам-аналогам DS200 Hf и MAR M200 + Hf зарубежных производителей – фирм Cannon-Muskegon Corporation и HOWMET Ltd.

Опытные партии литых прутковых заготовок из сплава ВЖМ200 в количестве 1640 кг поставлены на предприятия АО «ОДК» для опробования при литье рабочих лопаток ГТД перспективного двигателя ПД-8. Во ФГУП «ВИАМ» организовано серийное производство литых прутковых заготовок из сплава ВЖМ200 для обеспечения потребностей отечественной авиационной промышленности.

### Библиографический список

1. Козлова С.М. «Суперджет-100»: под крылом кооперации // Мир транспорта. 2007. № 2 (18). С. 50–53.
2. Толбоев М.О. Гражданская авиация России: до и после Суперджета // Стандарты и качество. 2019. № 7. С. 80–82.
3. Базилова И.В. Основные проблемы реализации проекта «Sukhoi Superjet 100» // Вестник университета. 2018. № 6. С. 48–54.
4. Дурицын Д.Ю., Соколянский В.П. Результаты противопожарных операций самолетов-амфибий Бе-200 в 2004–2007 гг. // Полет. 2008. № 12. С. 35–37.
5. Тарасова А.В. Самолет-амфибия Бериев Бе-200 Альтаир // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 12. С. 4.
6. Mataveli Suave L., Cormier J., Villechaise P., Bertheau D., Benoit G., Cailletaud G., Marcin L. Anisotropy in creep properties of DS200 + Hf alloy // Materials at High Temperatures. 2016. No. 33. P. 361–371. DOI: 10.1080/09603409.2016.1159836.
7. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.

8. Тихонов А.И., Сазонов А.А. Инновационный Российский самолет Sukhoi Superjet 100 как вектор развития авиастроения будущего // Экономика и предпринимательство. 2018. № 7 (96). С. 289–292.
9. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2740929 Рос. Федерация. № 2020114551; заявл. 20.04.20; опубл. 21.01.21.
10. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
11. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. О направленной кристаллизации крупногабаритных отливок на установке УВНК-15 // Литейное производство. 2013. № 3. С. 22–24.
12. Герасимов В.В., Колядов Е.В. Технические характеристики и технологические возможности установок УВНК-9А и ВИП-НК для получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов // Литейщик России. 2012. № 11. С. 33–37.
13. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Рафинирование монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов от примесей серы и кремния и нейтрализация вредного влияния фосфора // Труды ВИАМ. 2017. № 4 (52). Ст. 04 (дата обращения: 15.02.2021). URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-4-4.
14. Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегированных ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // Вестник РФФИ. 2015. № 1 (85). С. 32–36.
15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Герасимов В.В., Симонов В.Н., Мин П.Г. Исследование закономерностей поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ // Наука и образование. 2012. № 4. С. 12–12. URL: <http://www.cyberlenika.ru> (дата обращения: 20.02.2021).
16. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Пучков Ю.А. Особенности диффузионного поведения примесей и рафинирующих добавок в никеле и монокристаллических жаропрочных сплавах // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 24–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-24-31.
17. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
18. Назаркин Р.М., Колодочкина В.Г., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Изменения микроструктуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 4 (45). С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-9-17.
19. Пигрова Г.Д. ТПУ-фазы в сплавах на никелевой основе с повышенным содержанием хрома // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 12 (606). С. 15–23.
20. Киселев Ф.Д. Исследование структуры материала рабочих лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. № 2. С. 28–37.