

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖМ200

П.Г. Мин¹, В.Е. Вадеев¹, С.И. Колесников¹, Д.А. Чемов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния примесей серы, фосфора, кремния и азота на основные характеристики (длительную усталостную прочность и кратковременные механические свойства) жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 для литья рабочих лопаток с направленной структурой для газотурбинного двигателя ПД-8. Установлено, что при повышенном содержании данных примесей уменьшается время до разрушения сплава при температуре 1000 °С на базах 100 и 500 ч и снижается его пластичность при температуре 20 °С, а также число циклов до разрушения при испытании на МнЦУ при температуре 900 °С в сплаве с добавкой кремния и азота.

Ключевые слова: литейный жаропрочный никелевый сплав, направленная кристаллизация, примеси, механические свойства, длительная прочность, усталость

Для цитирования: Мин П.Г., Вадеев В.Е., Колесников С.И., Чемов Д.А. Влияние примесей на механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.

Scientific article

THE EFFECT OF IMPURITIES ON MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF THE CAST NICKEL-BASE SUPERALLOY VZhM200

P.G. Min¹, V.E. Vadeev¹, S.I. Kolesnikov¹, D.A. Chemov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of the study of the effect of sulfur, phosphorus, silicon and nitrogen impurities on the main properties of the high-temperature nickel alloy VZhM200 for blades casting with a directional structure of the PD-8 gas turbine engine: long-term, fatigue strength and short-term mechanical properties are presented. It was found that with an increased content of these impurities in the alloy, the time to destruction decreases at $T = 1000$ °C at bases of 100, 500 h and plasticity at $T = 20$ °C. It was also found that the number of cycles to failure was reduced when tested for high-cycle fatigue at $T = 900$ °C in the alloy with the addition of silicon and nitrogen.

Keywords: cast heat-resistant nickel-base superalloy, directional crystallization, impurities, mechanical properties, long-term strength, fatigue

For citation: Min P.G., Vadeev V.E., Kolesnikov S.I., Chemov D.A. The effect of impurities on mechanical and operational properties of the cast nickel-base superalloy VZhM200. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.

Введение

Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖМ200 предназначен для изготовления ответственных и высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей, таких как рабочие лопатки с направленной структурой, работоспособные до температуры 1000 °С. Данный сплав применяется в конструкции перспективного авиационного двигателя ПД-8 [1, 2] с тягой 8 тонн, созданного с целью импортозамещения французского двигателя SaM-146 для авиалайнера Sukhoi Super Jet NEW (SSJ-NEW) [3].

Для обеспечения высокой потребности в новых двигателях [4] в ПАО «ОДК-Сатурн» организовано современное производство турбинных лопаток, в том числе из сплава ВЖМ200. В процессе производства образуется значительное количество литейных кондиционных отходов, представляющих собой бракованные отливки, прибыльные части и металл из литниково-питающих систем. С ростом потребления сплава пропорционально увеличивается количество образующихся литейных отходов, содержащих дорогостоящие и дефицитные элементы – в первую очередь редкие металлы (например, содержание гафния в сплаве ВЖМ200 составляет 1,65 % (по массе)), возврат которых в производство рационален при использовании ограниченных природных ресурсов.

Кроме того, для повышения конкурентоспособности нового двигателя целесообразно снизить стоимость применяемого материала путем вовлечения в цикл производства максимального количества отходов, при этом необходимо обеспечить уровень качества продукции, соответствующий сплаву, изготовленному из первичных (свежих) шихтовых материалов. Эта задача осложняется наличием в литейных отходах повышенного содержания вредных примесей и газов: в прибыльных частях отливок концентрируются легкие неметаллические включения, а расплав загрязняется в результате взаимодействия с керамикой литейной формы [5]. Для сплава ВЖМ200 данный фактор имеет особое значение, поскольку входящий в его состав гафний является химически активным элементом и обладает высоким сродством к кислороду, а в процессе направленной кристаллизации расплав длительное время контактирует с керамикой литейной формы.

Поэтому для разработки технологии переработки отходов сплава ВЖМ200 целесообразно предварительно провести исследования по влиянию содержащихся в них примесей на механические и эксплуатационные свойства сплава. Подобные исследования ранее проводили на литейных жаропрочных никелевых сплавах с равноосной [6–13] и монокристаллической [13–18] структурами. Однако структура отливок из сплава ВЖМ200 представляет собой множество тонкостолбчатых однонаправленных зерен и является уникальной, так как в России не отливают детали с такой структурой из других отечественных жаропрочных никелевых сплавов. Для формирования данной макроструктуры применяют метод направленной кристаллизации с использованием поликристаллических затравок с заданной кристаллографической ориентацией <001> [19].

В представленной работе проведены исследования влияния наиболее вредных примесей для литейных жаропрочных никелевых сплавов (серы, фосфора, кремния и азота) на основные характеристики сплава ВЖМ200: длительную усталостную прочность и кратковременные механические свойства.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖМ200. Определено содержание легирующих элементов и микродобавок в сплаве ВЖМ200, % (по массе) [20]:

Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	B	Zr	La	Ce	Ca
Осно- ва	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 проводили из свежих шихтовых материалов в промышленной вакуумной индукционной печи вместимостью тигля 350 кг. Для получения отливок с направленной структурой полученные литые прутковые заготовки после механической обработки переплавляли с заливкой в керамические блоки в плавильно-заливочной установке УВНК-9 [21–23] с применением поликристаллических затравок с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$. При литье заготовок совместно с литой прутковой заготовкой дополнительно вводили навеску, содержащую примесные элементы: кремний – в чистом виде, фосфор и серу – в виде лигатур с железом, азот – в виде азотированного феррохрома.

Отливки подвергали термической обработке, включающей закалку (гомогенизацию) и старение в камерных электропечах сопротивления, после чего изготавливали образцы для испытаний механических свойств.

Содержание примеси серы в отливках определяли инфракрасным методом, азота – кондуктометрическим методом, примесей кремния и фосфора – масс-спектрометрическим методом с тлеющим разрядом [24].

На термически обработанных образцах проводили испытания механических свойств: на растяжение при температуре 20 °С, на длительную прочность при температурах 900 и 1000 °С, на многоцикловую усталость при температуре 900 °С на базе 10^7 циклов при коэффициенте асимметрии $R = -1$, на гадких образцах.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Как показывает опыт, в жаропрочных никелевых сплавах, применяемых для литья отливок с направленной или монокристаллической структурой, особое внимание следует уделять примесям кремния, фосфора, серы и азота.

Так, кремний и фосфор переходят в расплав вследствие взаимодействия с материалом литейной формы, содержащей связующие на основе оксидов данных элементов. Эти примеси отрицательно влияют на основные характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов. Кремний увеличивает количество легкоплавкой фазы, способствует образованию карбидов неблагоприятной игольчатой формы [25], что приводит к снижению жаропрочности и пластичности. Кроме того, кремний способствует выделению из твердого раствора топологически плотноупакованных фаз [12] при длительной эксплуатации лопаток из литейных жаропрочных никелевых сплавов. Обогащенная фосфором фаза концентрируется в междендритных областях и является источником образования и распространения трещин. Это ускоряет процесс разрушения сплава при высоких температурах и снижает показатели прочности и пластичности [9, 26], а соединение NiP имеет низкую температуру плавления (850 °С), что отрицательно влияет на жаропрочность материала и ресурс лопаток, эксплуатируемых при температурах >900 °С.

Помимо данных элементов, для исследований выбрана сера как одна из наиболее вредных примесей, оказывающих отрицательное влияние на комплекс эксплуатационных свойств жаропрочных никелевых сплавов. Сера образует неметаллические включения в виде сульфидов, которые являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации лопаток. Она образует с никелем легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 643 °С [10]. Кроме того, в ряде работ [17, 27, 28] отмечается отрицательное влияние серы на стойкость к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии защитных покрытий, наносимых на детали из жаропрочных никелевых сплавов. Сера поступает в сплав из первичных (свежих) шихтовых материалов, поскольку неизбежно присутствует в них как примесь. При переработке отходов литейных жаропрочных никелевых сплавов в виде деталей,

отработавших свой ресурс, следует учитывать вероятность дополнительного загрязнения их серой за счет насыщения продуктами сгорания топлива. Кроме того, источником загрязнения литейных отходов жаропрочных никелевых сплавов данной примесью являются смазывающие охлаждающие жидкости и масла, содержащие соединения серы. Данные вещества должны быть удалены с поверхности металла перед использованием его в производстве, однако существует риск неполного удаления таких загрязнений.

При литье фасонных отливок расплав неизбежно взаимодействует с остаточными газами (кислородом и азотом) в рабочей камере вакуумной печи, поэтому имеется вероятность насыщения отходов литейного производства данными примесями, особенно при многократном переплаве металла. Повышенное содержание газов также снижает свойства литейных жаропрочных сплавов. Известно, что с повышением содержания азота увеличивается микропористость в жаропрочных никелевых сплавах [29, 30]. Для сплавов с монокристаллической структурой азот – вредная примесь, в том числе потому, что при наличии сильных нитридообразователей, таких как титан, он способствует образованию карбонитридов, которые при кристаллизации, в свою очередь, способствуют зарождению «паразитных» зерен [14, 15].

На установке УВНК-9 проведена серия плавов сплава ВЖМ200 с добавками примесей кремния, фосфора, серы и азота. В плавку с условным номером 0 (далее – стандартная плавка) примеси не вводили. Содержание примесей в металле данной плавки составило, % (по массе): 0,021 кремния, 0,00065 фосфора, 0,00022 серы, 0,0007 азота. В плавки 1–3 вводили кремний. Остаточное содержание данной примеси составило соответственно 0,093; 0,166 и 0,243 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,2$ % (по массе). В плавки 4 и 5 вводили фосфор, в результате получено его остаточное содержание соответственно 0,0054 и 0,0141 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,015$ % (по массе). На плавках с введением серы (6–8) содержание данной примеси составило соответственно 0,0038; 0,0067 и 0,0130 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,01$ % (по массе). На плавках 9 и 10, при проведении которых введен азот, получено его остаточное содержание соответственно 0,0018 и 0,0033 % (по массе) (содержание азота в сплаве ВЖМ200 не регламентируется).

Одной из основных характеристик, обеспечивающих комплекс служебных свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов, является длительная прочность при рабочей температуре. Результаты испытаний на длительную прочность при температуре 1000 °С и напряжении 200 (на базе 100 ч) и 145 МПа (на базе 500 ч) сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей представлены в табл. 1.

В сплаве ВЖМ200 с добавкой кремния (плавки 1 и 2) время до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа на базе 100 ч уменьшилось на 24–26 % относительно стандартной плавки, в которую примеси не вводили, однако при испытании на длительной базе (500 ч) при напряжении 145 МПа значения данной характеристики находятся приблизительно на одном уровне со стандартной плавкой. Отрицательное влияние на жаропрочность сплава повышенного содержания кремния (плавка 3: 0,243 % (по массе) [Si]) проявляется при напряжении как 200 ($\tau_{cp}^{1000} = 60$ ч), так и 145 МПа ($\tau_{cp}^{1000} = 411$ ч), т. е. время до разрушения соответственно на 36 и 21 % меньше, чем у стандартной плавки.

На плавке 4 (0,0054 % (по массе) [P]) наблюдается некоторое снижение времени до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа, однако при напряжении 145 МПа долговечность сплава ВЖМ200 соответствует уровню стандартной плавки. При содержании фосфора в сплаве ВЖМ200 практически на верхнем допустимом

пределе (0,0141 % (по массе) на плавке 5 при норме $\leq 0,015$ % (по массе)) жаропрочность сплава при температуре 1000 °С снижается: время до разрушения при напряжении 200 МПа составило $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 61$ ч, что на 38 % меньше, чем у стандартной плавки, а при напряжении 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 420$ ч, т. е. на 19 % меньше.

Таблица 1

Результаты испытаний сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей на длительную прочность при температуре 1000 °С на базах 100 и 500 ч (средние значения)

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		Время до разрушения τ , ч, при напряжении, МПа	
		фактическое	норма по ТУ (не более)	200 на базе 100 ч	145 на базе 500 ч
0	–	0,021 Si; 0,00065 P; 0,00022 S; 0,0007 N	0,2 Si 0,015 P 0,01 S	99	520
1	Si	0,093	0,2	75*	533*
2		0,166		74*	511
3		0,243		60	411
4	P	0,0054	0,015	82	526
5		0,0141		61	420
6	S	0,0038	0,01	88	447*
7		0,0067		80	473
8		0,0130		77*	424*
9	N	0,0018	–	93*	475
10		0,0033		59	444

* Представлены результаты испытаний одного образца.

В сплаве с содержанием серы, % (по массе): 0,0038 – плавка 6; 0,0067 – плавка 7; 0,0130 – плавка 8, жаропрочность при температуре 1000 °С понижена относительно стандартной плавки. Наиболее выраженное влияние серы наблюдается на плавке 8 (0,0130 % (по массе) [S]): при напряжении 200 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 77$ ч, а при 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 424$ ч, что соответственно на 22 и 18 % меньше, чем у стандартной плавки.

Установлено также снижение жаропрочности сплава ВЖМ200 с повышением содержания азота при температуре 1000 °С: на плавке 9 (0,0018 % (по массе) [N]) время до разрушения при напряжении 145 МПа составило $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 475$ ч против 520 ч на стандартной плавке (0,0007 % (по массе) [N]). На плавке 10 (0,0033 % (по массе) [N]) время до разрушения при напряжении 200 МПа составило всего $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 59$ ч, а при 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 444$ ч, т. е. соответственно на 40 и 15 % меньше, чем на стандартной плавке.

Важное место среди механических свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов занимают усталостные характеристики [31], так как детали из данных материалов в большинстве случаев претерпевают циклические и знакопеременные нагрузки. Вредные примеси могут оказывать отрицательное влияние на сопротивление материала усталостному разрушению, что показано в работе [32]. Результаты испытаний

на многоцикловую усталость (МнЦУ) сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей при температуре 900 °С на базе 10^7 циклов представлены в табл. 2. При прохождении образцом удвоенной базы ($2 \cdot 10^7$ циклов) испытание прекращали, образец снимали до разрушения.

Таблица 2

Результаты испытаний на многоцикловую усталость сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей (температура 900 °С на базе 10^7 циклов при $\sigma_{\max} = 275$ МПа, гладкие образцы)

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		Результаты испытаний	
		фактическое	норма по ТУ (не более)	Число циклов до разрушения	Состояние образца после испытания
1	Si	0,093	0,2	20 001 101 20 000 202 20 000 202	Снят до разрушения
2		0,166		9 617 704 20 000 021	Разрушен Снят до разрушения
3		0,243		16 599 672 12 162 869	Разрушен
4	P	0,0054	0,015	20 010 008 20 001 102	Снят до разрушения
5		0,0141		10 629 427 14 860 224	Разрушен
6	S	0,0038	0,01	20 000 205 20 001 105	Снят до разрушения
7		0,0067		14 451 953 20 001 103	Разрушен Снят до разрушения
8		0,0130		20 000 204 19 817 793	Снят до разрушения Разрушен
9	N	0,0018	-	20 000 204 20 000 201	Снят до разрушения
10		0,0033		14 648 002 779 443	Разрушен

Видно, что при испытаниях на МнЦУ при температуре 900 °С с амплитудой нагружения 275 МПа базу из 10^7 циклов прошли все образцы с добавками кремния (кроме одного образца плавки 2, который разрушился близко к базе испытаний, спустя 9 617 704 циклов), фосфора и серы. Самый низкий результат получен на плавке 10 с содержанием азота 0,0033 % (по массе), причем один из образцов не прошел базу и разрушился спустя всего 779 443 циклов. Снижение числа циклов до разрушения отчетливо наблюдается с увеличением содержания азота в сплаве ВЖМ200: на плавке 9 (0,0018 % (по массе) [N]) оба испытанных образца сняты до разрушения после прохождения удвоенной базы испытаний, тогда как на плавке 10 (0,0033 % (по массе) [N]) оба образца разрушились.

С увеличением содержания кремния в сплаве ВЖМ200 снижается количество циклов до разрушения: на плавке 1 (0,093 % (по массе) [Si]) все испытанные образцы прошли удвоенную базу испытаний, на плавке 2 (0,166 % (по массе) [Si]) – только один образец, а на плавке 3 (0,243 % (по массе) [Si]) не прошел ни один из испытанных образцов.

На плавке 4 (0,0054 % (по массе) [P]) оба образца прошли удвоенную базу испытаний и не разрушились, а на плавке 5 (0,0141 % (по массе) [P]) среднее число циклов до разрушения для двух образцов составило 12 744 825.

При испытании по данному режиму оба образца плавки 6 (0,0038 % (по массе) [S]) прошли удвоенную базу испытаний, а на плавках 7 (0,0067 % (по массе) [S]) и 8 (0,013 % (по массе) [S]) – только по одному образцу. При этом явного уменьшения числа циклов до разрушения с увеличением содержания серы в сплаве не наблюдается.

Для испытаний на кратковременное растяжение при температуре 20 °С выбраны плавки с наибольшим содержанием примесных элементов: плавки 3 (0,243 % (по массе) [Si]) и 8 (0,013 % (по массе) [S]), в которых содержание кремния и серы превысило норму ТУ (0,2 и 0,01 % (по массе) соответственно), а также плавка 5 (0,0141 % (по массе) [P]), в которой содержание фосфора близко к максимально допустимому (0,015 % (по массе)) для сплава ВЖМ200. Выбраны также обе плавки с добавкой азота – 9 и 10 (0,0018 и 0,0033 % (по массе) [N] соответственно), поскольку его содержание в них превышает стандартный уровень в сплаве ВЖМ200 – например, в металле опытно-промышленных партий, на которых проведена паспортизация данного материала, содержание азота составляло 0,0004–0,0006 % (по массе). Результаты испытаний на растяжение в сравнении с паспортными данными представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний при растяжении сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
		фактическое	норма по ТУ (не более)			
3	Si	0,243	0,2	1150	1010	7,8
5	P	0,0141	0,015	1130	1000	8,2
8	S	0,0130	0,01	985	950	4,2
9	N	0,0018	–	1060	950	7,0
10		0,0033		1085	1020	5,8
Среднее паспортное значение				1230	990	12,5
Минимальное паспортное значение				1120	970	10,5

Повышенное содержание примесей кремния, фосфора, серы и азота снижает пластичность сплава ВЖМ200 при комнатной температуре. Значения относительного удлинения на всех плавках получены ниже минимальных паспортных значений: с добавкой кремния – на 26 %, с добавкой фосфора – на 22 %, с добавкой серы – на 60 %, с добавкой азота – на 33–45 %. Наименьшие значения относительного удлинения получены на плавках 8 (0,013 % (по массе) [S]) и 10 (0,0033 % (по массе) [N]): 4,2 и 5,8 % соответственно. Кроме того, значения пределов прочности (на плавке 8 с добавкой серы и на плавках 9 и 10 с добавкой азота) и текучести (на плавках 8 и 9) снижены относительно минимального паспортного значения. Таким образом, ни на одном образце с добавкой примесных элементов не получены значения предела прочности, соответствующие или превышающие средний паспортный уровень.

Заключения

Установлено, что в сплаве ВЖМ200 с добавкой кремния, фосфора, серы и азота снижается время до разрушения при испытании на длительную прочность при температуре 1000 °С. В металле с повышенным содержанием кремния (0,243 % (по массе)), фосфора (0,0141 % (по массе)) и азота (0,0033 % (по массе)) время до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа снижается на 39; 38 и 40 % соответственно, а при температуре 1000 °С и напряжении 145 МПа – на 21, 19 и 15 % соответственно. Влияние серы более выражено при повышенном содержании (0,0130 % (по массе)) – на

базе 100 ч время до разрушения снижается на 22 %, а на базе 500 ч – на 18 % относительно стандартной плавки без добавления серы.

Установлено снижение значений циклов до разрушения для сплава ВЖМ200 при испытании на МнЦУ при температуре 900 °С с увеличением содержания кремния, а также отрицательное влияние азота на данную характеристику: наименьшее среднее число циклов до разрушения получено в металле с содержанием азота 0,0033 % (по массе).

В металле с повышенным содержанием примесей кремния, фосфора, серы и азота снижается пластичность сплава ВЖМ200 при комнатной температуре – до 60 % относительно минимального паспортного значения. На 12 % снижен также предел прочности относительно минимального паспортного значения в металле с содержанием серы 0,013 % (по массе).

Список источников

1. Тихонов А.И., Краев В.М., Силуянова М.В. Перспективы развития российского авиационного двигателестроения на основе унифицированного газогенератора // СТИН. 2023. № 6. С. 71–74.
2. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 0.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
3. Константинов И.В. Обеспечение технологического суверенитета авиационной отрасли на примере самолета SUKHOI SUPERJET NEW // Научные достижения и инновационные подходы: теория, методология, практика: сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. Анапа, 2022. С. 99–103.
4. В 2024 году планируют выпустить более 40 двигателей ПД-8 // ИТАР-ТАСС: офиц. сайт. URL: <https://tass-ru/ekonomika/18995881> (дата обращения: 02.09.2024).
5. Мин П.Г., Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Закономерности поведения примесей при получении монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Перспективы развития металлургических технологий: сб. тез. VII Конф. молодых специалистов. М., 2016. С. 36–37.
6. Сидоров В.В. Воздействие примесей и поверхностно-активных добавок на формирование структуры и свойства высокожаропрочных литейных сплавов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1989. 50 с.
7. Приданцев М.В. Влияние примесей и редкоземельных элементов на свойства сплавов. М.: Металлургиздат, 1962. 208 с.
8. Zhuanggi Hu, Hongwei Song. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy // Journal of material Science Technology. 2005. Vol. 21. P. 73–76.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a cast Ni-base Superalloy // Journal of Material Science Technology. 2002. Vol. 18. No. 6. P. 555–557.
10. Holt R.T., Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys // International metals reviews. 1976. Vol. 21. No. 1. P. 1–24.
11. Sun C., Huang R.F., Guo J.T., Hu Z.Q. Sulphur distribution in K24 cast nickel-base superalloy and its influence on mechanical properties // High Temperature Technology. 1988. Vol. 6 (3). P. 145–148.
12. Тигрова Г.Д., Коргка С.И., Гребцова Т.М. Влияние кремния на фазовый состав сплавов на никелевой основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 4. С. 38–41.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 68–78.
14. Каблов Д.Е. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и повышение их эксплуатационных свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 17 с.

15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и его влияние на их эксплуатационные свойства // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 1. С. 8–12.
16. Epishin A.L., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Loshchinin Yu.V., Link T. Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloy // *Defect and Diffusion Forum*. 2011. Vol. 309–310. P. 121–126.
17. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The Control of Sulfur Content in Nickel-Base, Single Crystal Superalloys and Its Effect on Cyclic Oxidation Resistance // *Superalloys-1996*. 1996. P. 71–80.
18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»*. Екатеринбург, 2011. С. 31–38.
19. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Разработка нового жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 и технологии его производства для литья методом направленной кристаллизации рабочих лопаток перспективных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
20. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2740929 Рос. Федерация. № 2020114551; заявл. 20.04.20; опубл. 21.01.21.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Якимович П.В., Алексеев А.В. Определение серы в литейных жаропрочных никелевых сплавах методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-118-125.
25. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А., Кулебякина А.М., Дмитриева Л.И. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием // *Металлы*. 1990. № 1. С. 94–98.
26. Yaoxiao Zhu, John Radavich, Zhi Zheng et al. Development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L // *Superalloys-2000*. 2000. P. 329–339.
27. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys // *Superalloys-1992*. 1992. P. 807–816.
28. Tammy M. Simpson and Allen R. Price. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys // *Superalloys-2000*. 2000. P. 387–392.
29. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys // *High Temperature Materials and Processes*. 2005. Vol. 24. No. 2. P. 101–109.
30. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 566 с.
31. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Карашаев М.М., Рыжков П.В. Испытания на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле жаропрочных металлических материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.
32. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примесей серы и фосфора на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.

References

1. Tikhonov A.I., Kraev V.M., Siluyanov M.V. Prospects for the Development of Russian Aviation Engine Building Based on a Unified Gas Generator. *STIN*, 2023, no. 6, pp. 71–74.
2. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
3. Konstantinov I.V. Ensuring technological sovereignty of the aviation industry using the SUKHOI SUPERJET NEW aircraft as an example. *Scientific achievements and innovative approaches: theory, methodology, practice: collection of scientific papers based on the materials of the VIII International scientific and practical conf. Anapa, 2022*, pp. 99–103.
4. *More than 40 PD-8 engines are planned to be produced in 2024*. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18995881> (accessed: September 02, 2024).
5. Min P.G., Kablov D.E., Sidorov V.V., Vadeev V.E. Patterns of impurity behavior in the production of single-crystal heat-resistant nickel alloys and the development of effective methods for their refining. *Prospects for the development of metallurgical technologies: abstracts VII Conf. of young specialists. Moscow, 2016*, pp. 36–37.
6. Sidorov V.V. *The effect of impurities and surface-active additives on the formation of the structure and properties of high-heat-resistant casting alloys*: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Moscow, 1989, 50 p.
7. Pridancev M.V. *The effect of impurities and rare earth elements on the properties of alloys*. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 208 p.
8. Zhuanggi Hu, Hongwei Song. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy. *Journal of material Science Technology*, 2005, vol. 21, pp. 73–76.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a cast Ni-base Superalloy. *Journal of Material Science Technology*, 2002, vol. 18, no. 6, pp. 555–557.
10. Holt R.T., Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys. *International metals reviews*, 1976, vol. 21, no. 1, pp. 1–24.
11. Sun C., Huang R.F., Guo J.T., Hu Z.Q. Sulphur distribution in K24 cast nickel-base superalloy and its influence on mechanical properties. *High Temperature Technology*, 1988, vol. 6 (3), pp. 145–148.
12. Tigrova G.D., Korkka S.I., Grebtsova T.M. Effect of silicon on the phase composition of nickel-based alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1980, no. 4, pp. 38–41.
13. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Features of the technology of smelting and pouring modern foundry high-heat-resistant nickel alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2011, no. SP2, pp. 68–78.
14. Kablov D.E. *Regularities of nitrogen behavior in the production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and improving their performance properties*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2012, 17 p.
15. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Regularities of nitrogen behavior during production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and its influence on their operational properties. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2014, no. 1, pp. 8–12.
16. Epishin A.L., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Loshchinin Yu.V., Link T. Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloy. *Defect and Diffusion Forum*, 2011, vol. 309–310, pp. 121–126.
17. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The Control of Sulfur Content in Nickel-Base, Single Crystal Superalloys and Its Effect on Cyclic Oxidation Resistance. *Superalloys-1996*, 1996, pp. 71–80.
18. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Production of cast bar (blend) preparations from modern cast high-heat resisting nickel alloys. *All-Rus. Sci.-techn. conf. «Problems and perspectives of development of metallurgy and mechanical engineering with use of complete basic researches and research and development»*, Ekaterenburg, 2011, pp. 31–38.

19. Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. The development of the new VZhM200 superalloy and the technology of its production for casting of the advanced engines' blades by the directional crystallization. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
20. *Heat resisting cast alloy on the basis of nickel and the product which has been executed of it*: pat. 2740929 Rus. Federation; appl. 20.04.20; publ. 21.01.21.
21. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
22. Gerasimov V.V., Visik E.M., Kolyadov E.V. On directional crystallization of large-sized castings on the UVNK-15 unit. *Liteynoe proizvodstvo*, 2013, no. 3, pp. 22–24.
23. Gerasimov V.V., Kolyadov E.V. Technical characteristics and technological capabilities of the UVNK-9A and VIP-NK units for producing single-crystal castings from heat-resistant alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 33–37.
24. Yakimovich P.V., Alekseev A.V. Determination of sulfur in casting heat-resistant nickel alloys by GD-MS. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2020-0-1-101-108.
25. Sidorov V.V., Morozova G.I., Petrushin N.V., Kuleshova E.A., Kulebyakina A.M., Dmitrieva L.I. Phase composition and thermal stability of cast heat-resistant nickel alloy with silicon. *Metally*, 1990, no. 1, pp. 94–98.
26. Yaoxiao Zhu, John Radavich, Zhi Zheng et al. Development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L. *Superalloys-2000*, 2000, pp. 329–339.
27. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys. *Superalloys-1992*, 1992, pp. 807–816.
28. Tammy M. Simpson and Allen R. Price. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys. *Superalloys-2000*, 2000, pp. 387–392.
29. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys. *High Temperature Materials and Processes*, 2005, vol. 24, no. 2, pp. 101–109.
30. Sims C., Hagel V. *Heat-resistant alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 566 p.
31. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Karashaev M.M., Ryzhkov P.V. Low cycle dwell fatigue testing of heat resistant metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.
32. Kablov D.E., Belyaev M.S., Sidorov V.V., Min P.G. The influence of sulfur and phosphorus impurities on low cycle fatigue of single crystals of ZhS36-VI alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.

Информация об авторах

Мин Павел Георгиевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вадеев Виталий Евгеньевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Колесников Станислав Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чемов Дмитрий Александрович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel G. Min, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaliy E. Vadeev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav I. Kolesnikov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitriy A. Chemov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.09.2024.

The article was submitted 26.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.09.2024.