
Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-129-137

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖЛ718

П.Г. Мин¹, П.В. Якимович¹, А.В. Алексеев¹

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

Аннотация. Приведены результаты разработки комплекта стандартных образцов литейного жаропрочного сплава ВЖЛ718. Описан процесс выбора оптимального состава сплава, а также применение различных технологий для получения материала, пригодного для градуировки различного спектрального оборудования: масс-спектрометры с тлеющим разрядом, оптико-эмиссионные и рентгенофлуоресцентные спектрометры и др. Проведено определение 22 элементов (Fe, Al, Cr, Co, Mo, Ti, Nb, Ta, P, Mn, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Te, Pb, Bi, V, Ag, Sn) в полученных стандартных образцах.

Ключевые слова: стандартные образцы, рафинирование, литейные жаропрочные сплавы, рентгенофлуоресцентная спектрометрия, атомно-эмиссионная спектрометрия, масс-спектрометрия с тлеющим разрядом, оптико-эмиссионная спектроскопия

Для цитирования: Мин П.Г., Якимович П.В., Алексеев А.В. Разработка комплекта стандартных образцов литейного жаропрочного сплава ВЖЛ718 // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-129-137.

Scientific article

DEVELOPMENT OF A SET OF REFERENCE SAMPLES OF CASTING HEAT-RESISTANT ALLOY VZHL718

P.G. Min¹, P.V. Yakimovich¹, A.V. Alekseev¹

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

Abstract. Presents the results of the development of a set of standard samples of cast superalloy VZhL718. The process of choosing the optimal composition of the alloy is described, as well as the use of various technologies for obtaining a material suitable for calibrating various spectral equipment: mass spectrometers with a glow discharge, optical emission and x-ray fluorescence spectrometers, etc. The determination of 22 elements (Fe, Al, Cr, Co, Mo, Ti, Nb, Ta, P, Mn, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Te, Pb, Bi, V, Ag, Sn) in the obtained standard samples.

Keywords: standard samples, refining, cast heat-resistant alloys, x-ray fluorescence spectrometry, atomic emission spectrometry, glow discharge mass spectrometry, optical emission spectroscopy

For citation: Min P.G., Yakimovich P.V., Alekseev A.V. Development of a set of reference samples of casting heat-resistant alloy VZhL718. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-129-137.

Введение

В современной экономике авиационная промышленность занимает одно из ведущих мест по использованию наукоемкой, высокотехнологичной продукции, в особенности это касается применяемых материалов, обладающих уникальными свойствами – жаропрочностью, термостойкостью, высокой механической прочностью [1, 2]. К таким материалам относятся жаропрочные литейные сплавы, которые позволяют различным изделиям и деталям газотурбинных двигателей работать в условиях экстремальных температур – до 1250 °С [3, 4]. Для выпуска качественных жаропрочных сплавов необходимо производить контроль их химического состава, определяя множество как основных, так и примесных элементов [5]. Для обеспечения правильности химического анализа и единства измерений, а также для быстрого и успешного внедрения новых перспективных материалов чрезвычайно важно использовать стандартные образцы (СО) состава соответствующих сплавов. Содержание элементов в СО устанавливали по результатам межлабораторных экспериментов с привлечением ведущих исследовательских институтов и заводских аналитических лабораторий авиационной отрасли (до 10 лабораторий), обладавших большим опытом в исследованиях химического состава сплавов на различной основе. Длительность цикла от момента начала разработки комплекта СО категории ГСО (государственный стандартный образец) или ОСО (отраслевой стандартный образец) до получения сертификата (свидетельства) составляла от 1,5 до 2 лет [6, 7].

В ВИАМ с 1941 г. проводятся научно-исследовательские работы по разработке и выпуску СО жаропрочных сплавов на различных основах и разных марок. Данные СО должны подходить для проведения анализа как готовой продукции, так и для экспресс-анализа методами оптико-эмиссионной и рентгенофлуоресцентной спектроскопии непосредственно во время плавки жаропрочного сплава [8].

Оптико-эмиссионный метод анализа основан на измерении интенсивности эмиссионной аналитической линии определяемого элемента, возникающей во время искрового разряда между электродом спектрометра и материалом твердого анализируемого образца. Благодаря простоте и возможности определения широкого перечня элементов непосредственно из монолитной пробы (что уменьшает продолжительность анализа), а также невысокой стоимости оборудования данный метод анализа получил широкое распространение и имеется в распоряжении практически всех металлургических предприятий России. Вместе с тем главной проблемой оптико-эмиссионной спектроскопии являются спектральные интерференции – наложения линий эмиссии одних элементов на другие, а также матричный эффект [9].

Метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии также позволяет одновременно определять большое число элементов и отличается широкими диапазонами определяемых содержаний. Благодаря небольшому количеству спектральных линий элементов в рентгеновской области для данного метода наблюдается меньшее количество возможных наложений по сравнению с оптической эмиссией, однако основной проблемой остается сильное межэлементное влияние на интенсивность излучения искомым элементов, вызванное поглощением данного излучения мешающими элементами и основой, а также другими причинами [10]. Свести к минимуму указанные недостатки, а также повысить точность и правильность анализа возможно с помощью использования СО, близких по составу основных компонентов сплава к составу анализируемого материала. Необходимо также учитывать диапазоны содержаний определяемых элементов, указанные в технических условиях (ТУ) на анализируемые марки сплавов и соответствующие диапазоны в сертификатах на используемые СО. Диапазоны в СО должны

быть шире и перекрывать диапазоны, приведенные в ТУ на данную марку сплава. Несоблюдение данного правила, а также анализ с использованием стандартных калибровок, включенных в программное обеспечение оборудования, может привести к значительным ошибкам и погрешностям в результатах химического анализа. При этом величина данных ошибок может превышать или быть соизмерима с интервалами легирования, что делает невозможной корректировку процесса плавки и получения конечного материала с заданным составом [11].

Для получения качественного материала СО необходимо на этапе расчета его химического состава учесть весь диапазон содержаний определяемых элементов с выходом за предельные значения, установленные нормативными документами на данный тип сплава. Следует также принять во внимание возможное наличие спектральных интерференций эмиссионных линий определяемых элементов между собой и основой, при этом содержание основного элемента материала сплава должно быть стабильным для всех СО комплекта. При производстве образцов, состав которых выходит за пределы, указанные в нормативной документации, необходимо учитывать особенности выплавки материала соответствующих марок сплава, а также производить строгий входной контроль шихтовых материалов. Выплавка, а также все последующие этапы подготовки и обработки полученного материала проводятся по технологиям, соответствующим производству изделий из данных типов сплавов, а состав изготовленных СО должен быть однороден по всему объему материала. [12].

Далее полученные СО анализируют методами атомно-эмиссионной [13], рентгенофлуоресцентной и оптико-эмиссионной спектроскопии, а также масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой и с тлеющим разрядом [14, 15].

Таким образом, цель данной работы – разработка технологии изготовления комплекта СО состава литейного жаропрочного сплава ВЖЛ718 категории СОП (стандартный образец предприятия).

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

Материалы и методы

Материал СО выплавляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 в тигле вместимостью 100 кг из свежих шихтовых материалов, при этом в тигель загружали никель, хром, кобальт, вольфрам, ниобий, тантал, рений, алюминий и расплавляли при температуре 1540 °С.

Для рафинирования сплавов от вредных примесей вводили добавку щелочноземельных и редкоземельных металлов – магния, бария, кальция, стронция, лантана, иттрия, скандия. Данные металлы вступают в реакцию с вредными примесями, образуя тугоплавкие термически стойкие соединения, и таким образом их удаляют из состава конечного материала.

Редкоземельные элементы, а также кальций и магний образуют соединения с Р, As, Se, Те и другими элементами, которые могут выделяться на стенках тигля в процессе выплавки материала жаропрочного сплава либо концентрироваться в отдельную фазу при кристаллизации, что приводит к неоднородности распределения указанных элементов в материале СО. По этой причине решено редкоземельные элементы, а также кальций и магний вводить в отдельные экземпляры СО. Таким образом, в рамках данной работы предусмотрено изготавливать комплекты СО, состоящие из трех экземпляров СО с различным содержанием вышеперечисленных вредных примесей, трех экземпляров СО с различным содержанием редкоземельных металлов и одного экземпляра без специально введенных примесей. Последний планируется использовать в качестве

фоновом СО, предназначенного для применения при калибровке спектрометров. Легкоплавкие элементы в чистом виде сложно ввести в плавку жаропрочного сплава, а те, что переходят в состав сплава, имеют неоднородное распределение в объеме материала СО. Для того чтобы ввести от 0,0001 до 0,005 % (по массе) каждого элемента (Zn, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi) в никелевый сплав, изготовили лигатуру на основе алюминия с содержанием элементов от 0,05 до 0,1 % (по массе). Элементы вводили в чистом виде в алюминиевой фольге в расплав алюминия при температуре 710 ± 10 °С, расплав перемешивали, выдерживали 10 мин и заливали в цилиндрический водоохлаждаемый кокиль. Элементы As, Se и Te не удалось ввести, так как они практически не растворяются в алюминии и не образуют с ним соединений, остальные элементы растворились удовлетворительно. Поэтому вводили As, Se и Te в виде их ферросплавов с содержанием 10 % (по массе), которые готовили отдельно при спекании металлов с карбонильным железом.

Редкоземельные элементы, а также Ca и Mg вводили в отдельные плавки в виде лигатур на основе никеля с учетом «угара» (~75 %) при выплавке и отливке. Перед введением редкоземельных элементов в печь напускают аргон для установления давления 100 мм рт. ст.

Металл разливали в стальные трубы диаметром 90 мм. Некоторые плавки разливали через нагретый пенокерамический фильтр, выполненный из электрокорунда. Переход к технологии изготовления СО в виде цилиндров сопряжен с рядом технологических сложностей, а именно с отливкой плотного материала из жаропрочных никелевых сплавов. Так, при выплавке металла в вакуумных индукционных печах с последующей заливкой в стальные трубы длиной 300 мм в материале никелевого сплава образуются усадочные раковины, а также поры размером до 150 мкм, что недопустимо для всех видов анализа. Данную проблему устраняли путем переплава на установках направленной кристаллизации, для чего заготовку материала СО расплавляли и заливали в литейные формы, после чего форму с расплавленным металлом с контролируемой скоростью (2–30 мм/мин) опускали в расплавленный материал, который кристаллизуется фронтом без образования крупных пор.

Полученные слитки подвергали обработке по технологии высокоградиентной направленной кристаллизации на установке УВНК-9, что исключило образование трещин, раковин и пор в сплавах, а также обеспечивало высокую степень однородности и близость структуры материала СО к структуре изделий из данного типа сплава. Заливку проводили в керамические формы на основе электрокорунда со связующим в виде этилсиликата. Полученные заготовки $\varnothing 26$ мм и длиной 230 мм разрезали на отрезном станке на образцы высотой 15 мм и исследовали распределение элементов в объеме образцов масс-спектрометрическим методом с лазерным пробоотбором с диаметром пучка 720 мкм. Наблюдали существенное (на 1–2 порядка) снижение содержания легкоплавких элементов из-за их возгонки в вакуумной установке направленной кристаллизации, поэтому для изготовления материала СО использовали слитки диаметром $\varnothing 70$ мм, полученные после вакуумно-индукционной плавки без последующего переплава.

Наблюдали снижение содержания редкоземельных элементов и увеличение содержания кремния у краев полученных образцов после направленной кристаллизации, что связано с восстановлением кремния из материала формы. Для того чтобы уменьшить взаимодействие расплава с материалом формы изготовили экспериментальные керамические формы для отливки образцов ($\varnothing 26$ мм и длина 230 мм) двух видов:

– в первом варианте для изготовления лицевых слоев использовали керамическую суспензию с бескремнеземным связующим и оксидом иттрия (связующее – раствор

эпоксидной смолы в органическом растворителе и отвердитель аминного типа), обсыпку проводили крупнозернистым электрокорундом;

– во втором варианте обсыпку выполняли крупнозернистым оксидом иттрия.

Оба варианта материала форм не взаимодействуют с расплавом в процессе направленной кристаллизации.

Определение химического состава полученных СО проводили из монолитных проб сплава на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER (фирма Brukeraxs, Германия), оптико-эмиссионном спектрометре ARL iSpark 8880 (фирма Thermo Fisher Scientific, Германия) и масс-спектрометре с тлеющим разрядом Element GD Plus (фирмы Thermo Fisher Scientific, Германия), а из проб в виде стружки – на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc (фирма Thermo Fisher Scientific, Германия) и атомно-эмиссионном спектрометре Agilent 6800 (фирма Agilent Technologies, США).

Градуировку масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой и атомно-эмиссионного спектрометра проводили с применением стандартных растворов определяемых элементов производства High-Purity Standards. Для калибровки оборудования при анализе монолитов использовали СО, близкие по составу анализируемым сплавам. Конечный результат измерений получали путем усреднения результатов четырех определений (прожигов) одного образца, каждый прожиг состоял из четырех реплик измерений.

Для обработки образцов перед анализом использовали отрезной станок Labotom-5 с отрезными кругами $\varnothing 250$ мм и толщиной 1,5 мм типа 60A25. При подготовке поверхности проб применяли плоскошлифовальный станок с абразивными дисками на бумажной основе зернистостью 40 и 80 единиц.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены результаты определения основных (легирующих) элементов в полученных СО методом атомно-эмиссионной спектроскопии.

Таблица 1

**Результаты анализа стандартного образца сплава ВЖЛ718
методом атомно-эмиссионной спектроскопии**

Результат анализа	Содержание элементов, % (по массе)					
	Fe	Al	Cr	Mo	Ti	Nb
Введено	17,5	0,30	20,5	2,80	0,70	5,50
Найдено	$17,3 \pm 0,3$	$0,32 \pm 0,03$	$20,2 \pm 0,4$	$2,79 \pm 0,08$	$0,77 \pm 0,08$	$5,45 \pm 0,09$

Видно, что полученные значения содержаний элементов хорошо согласуются (введенное значение попадает в доверительный интервал найденного) с расчетной концентрацией шихтовых материалов, что свидетельствует о правильности выбранной технологии выплавки и точности предварительных расчетов. Некоторые элементы присутствовали в шихтовых материалах, поэтому их содержание оказалось больше, чем рассчитывалось. Исключение составляют кальций и магний, содержание которых значительно уменьшилось из-за их возгонки при температуре плавки, что учтено в дальнейшем при выплавке материалов СО (в табл. 1 не приведены).

Далее материал СО проанализирован на содержание вредных примесей методами масс-спектрометрии (табл. 2) и масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом (табл. 3).

Таблица 2

Результаты анализа стандартного образца сплава ВЖЛ718 методом масс-спектрометрии

Элемент	P	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd
Содержание элементов, % (по массе)	0,0004	0,060	0,0007	0,0002	0,0003	0,0004	0,0001
Требования по ТУ	<0,0005	<0,5	<0,010	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Элемент	Sb	Te	Pb	Bi	V	Ag	Sn
Содержание элементов, % (по массе)	0,00003	0,00004	0,00003	0,00007	0,0030	0,00001	0,00004
Требования по ТУ	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,010	<0,0005	<0,0005

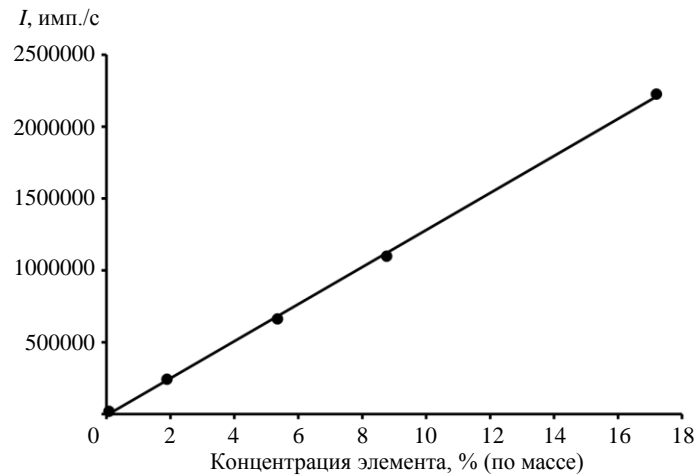
Таблица 3

Результаты анализа стандартного образца никелевого сплава ВЖЛ718
($n = 4$, $P = 0,95$, в условиях повторяемости без замены графитовых частей источника и конусов интерфейса) с применением различных способов расчета содержаний определяемых элементов

Элемент	Содержание элементов, % (по массе)			
	Расчет по RSF для сплава Inconel 718, градуировка по CRM (BAS SS-CRM 351/1)	Расчет по StdRSF (метод 2.1)	Расчет по StdRSF (метод 2.2)	Расчет по StdRSF («Thermo») от 2017
B	0,0020 ± 0,0001	0,0027 ± 0,0002	0,0031 ± 0,0002	0,0043 ± 0,0002
Mg	0,0012 ± 0,0001	0,0012 ± 0,00003	0,0011 ± 0,00003	0,0014 ± 0,00004
Al	0,57 ± 0,02	0,56 ± 0,02	0,50 ± 0,02	0,83 ± 0,03
Si	0,109 ± 0,007	0,125 ± 0,008	0,16 ± 0,01	0,19 ± 0,01
P	0,013 ± 0,001	0,020 ± 0,002	0,018 ± 0,001	0,0116 ± 0,0009
S	0,0008 ± 0,0001	0,0009 ± 0,0001	0,0010 ± 0,0002	0,0007 ± 0,0001
Ti	0,96 ± 0,03	0,92 ± 0,03	0,76 ± 0,03	0,70 ± 0,02
V	0,033 ± 0,002	0,035 ± 0,002	0,034 ± 0,002	0,028 ± 0,001
Cr	18,5 ± 0,6	17,8 ± 0,5	17,3 ± 0,5	20,2 ± 0,6
Mn	0,110 ± 0,005	0,109 ± 0,005	0,097 ± 0,004	0,099 ± 0,005
Fe	17,7 ± 0,4	17,9 ± 0,4	17,9 ± 0,4	15,0 ± 0,3
Co	0,34 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,32 ± 0,01
Ni	53,2 ± 0,9	52,9 ± 0,9	55 ± 1	57 ± 1
Cu	0,138 ± 0,009	0,15 ± 0,01	0,129 ± 0,008	0,23 ± 0,02
Ga	–	0,0025 ± 0,0002	0,0024 ± 0,0002	–
As	–	0,0017 ± 0,0002	0,0013 ± 0,0001	0,0012 ± 0,0001
Zr	0,0026 ± 0,0002	0,0033 ± 0,0003	0,0028 ± 0,0002	0,0024 ± 0,0002
Nb	5,2 ± 0,3	5,8 ± 0,3	4,7 ± 0,3	3,3 ± 0,2
Mo	3,1 ± 0,1	3,2 ± 0,1	2,9 ± 0,1	2,24 ± 0,08
Sn	0,0026 ± 0,0002	0,0033 ± 0,0003	0,0034 ± 0,0003	0,0026 ± 0,0002
Sb	0,00027 ± 0,00003	0,00043 ± 0,00005	0,00036 ± 0,00005	0,00047 ± 0,00006
Ta	0,0027 ± 0,0002	0,0029 ± 0,0002	0,0024 ± 0,0002	0,0024 ± 0,0002
W	0,085 ± 0,007	0,109 ± 0,009	0,084 ± 0,007	0,067 ± 0,005

Видно, что полученные значения содержаний вредных примесей меньше требований нормативной документации, что также подтверждает пригодность разработанной технологии для производства СО состава сплава ВЖЛ718.

Для проведения экспресс-анализа сплава марки ВЖЛ718 методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии с использованием полученных СО необходимым условием является линейная (прямая) зависимость аналитического сигнала от содержаний определяемых элементов для данного метода (см. рисунок).



Градуировочная зависимость определения концентрации молибдена на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER

На рисунке представлена такая зависимость с коэффициентом корреляции, равным 0,999, что позволяет сделать вывод о полной пригодности полученных СО для проведения химического контроля при полном цикле производства литейного жаропрочного сплава ВЖЛ718.

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Разработана технология изготовления материала СО состава литейного жаропрочного сплава ВЖЛ718.

Применение данной технологии обеспечивает однородность легирующих элементов и примесей в материале СО – величина отклонения содержания каждого элемента не превышает 1,5 % относительно среднего значения.

Показана возможность использования полученных СО для проведения химического контроля при производстве сплава ВЖЛ718.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
2. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
3. Попович А.А., Панченко О.В., Наумов А.А., Свиридов А.В., Скупов А.А., Сбитнева С.В. Сварка трением с перемешиванием алюминий-литиевого сплава В-1469-Т // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-11-17.
4. 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: 11.02.2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
5. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // *Компетентность*. 2017. № 2. С. 40–46.
6. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н. Опыт разработки стандартных образцов авиационных сплавов // *Мир измерений*. 2012. № 8. С. 31–35.

7. ГОСТ 8.753–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы материалов (веществ). М.: Стандартинформ, 2011. 19 с.
8. Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Варик Н.М. Непрерывные волокна оксида алюминия (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-27-34.
9. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 2. С. 9–11.
10. Handbook of x-ray spectrometry. 2nd ed., rev. and exp. Ed. R.E. Van Grieken, A.A. Marcowicz. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. P. 14–56.
11. Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф., Проценко О.М., Якимова М.С. Разработка стандартных образцов состава авиационных сплавов // *Стандартные образцы*. 2013. № 4. С. 30–34.
12. Карачевцев Ф.Н., Рассохина Л.И., Герасимов В.В., Висик Е.М. Получение стандартных образцов для экспресс-анализа жаропрочных никелевых сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2013. № 6. С. 18–19.
13. Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н., Механик Е.А. Определение химического состава высоколегированных никелевых сплавов авиационного назначения методом АЭС-ИСП в сочетании с микроволновой пробоподготовкой // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. № 9. С. 6–9.
14. Saka T. Glow discharge mass spectrometry // *Compendium of Surface and Interface Analysis*. 2018. Vol. 36. P. 211–217.
15. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.

References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Highly efficient cooling of GTE hot section blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
2. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
3. Popovich A.A., Panchenko O.V., Naumov A.A., Sviridov A.V., Skupov A.A., Sbitneva S.V. Friction stir welding of aluminum-lithium alloy V-1469-T. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-11-17.
4. 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: February 11, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
5. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Assessment of compliance of new materials using highlevel CO and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
6. Letov A.F., Karachevtsev F.N. Experience in the development of standard samples of aviation alloys. *Mir izmereniy*, 2012, no. 8, pp. 31–35.
7. State Standard 8.753–2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Standard materials (substances)*. Moscow: Standinform, 2011, 19 p.
8. Shavnev A.A., Babashov V.G., Varrik N.M. Continuous fibers based on alumina (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-27-34.
9. Kablov E.N., Morozov G.A., Krutikov V.N., Muravskaya N.P. Certification of standard samples of structure of complex-alloyed alloys using standard. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 9–11.
10. Handbook of x-ray spectrometry. 2nd ed., rev. and exp. Ed. R.E. Van Grieken, A.A. Marcowicz. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001, pp. 14–56.

11. Karachevtsev F.N., Letov A.F., Protsenko O.M., Yakimova M.S. Development of standard samples of the composition of aviation alloys. *Standartnyye obraztsy*, 2013, no. 4, pp. 30–34.
12. Karachevtsev F.N., Rassokhina L.I., Gerasimov V.V., Visik E.M. Obtaining standard samples for express analysis of heat-resistant nickel alloys. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2013, no. 6, pp. 18–19.
13. Parish R.M., Karachevtsev F.N., Zakvzdina T.N., mechanic E.A. Determination of the chemical composition of highly lifted nickel alloys of aviation purposes by NPES-ISP in combination with microwave sampling. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2013, vol. 79, no. 9, pp. 6–9.
14. Saka T. Glow discharge mass spectrometry. *Compendium of Surface and Interface Analysis*, 2018, vol. 36, pp. 211–217.
15. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 137, pp. 149–155.

Информация об авторах

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

Якимович Павел Витальевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Алексеев Андрей Владимирович, научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Pavel V. Yakimovich, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Alekseev, Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.06.2023.
The article was submitted 24.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing. 05.06.2023.