

Научная статья

УДК 543.51; 669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-124-133

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ИСКРОВОЙ ОПТИКО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.В. Алексеев¹, П.С. Петров¹

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

Аннотация. Проведено определение примесей (концентрация большей части элементов $<0,01$ % (по массе)) As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в никелевом сплаве методом искровой оптико-эмиссионной спектроскопии (ИОЭС). Подобраны параметры настройки оборудования для максимизации аналитических сигналов всех определяемых элементов. Выполнен анализ без применения стандартных образцов с использованием градуировочных зависимостей, заложенных в программное обеспечение оборудования. Правильность полученных результатов подтверждена сравнительным анализом методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Ключевые слова: оптико-эмиссионная спектроскопия, атомно-эмиссионная спектроскопия, никелевые сплавы, ИОЭС, анализ никеля, определение примесей

Для цитирования: Алексеев А.В., Петров П.С. Определение примесей в никелевых сплавах методом искровой оптико-эмиссионной спектроскопии // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-124-133.

Scientific article

DETERMINATION OF IMPURITIES IN NICKEL ALLOYS BY THE METHOD OF PARK OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY

A.V. Alekseev¹, P.S. Petrov¹

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

Abstract. Impurities (the concentration of most elements is less than 0,01 % wt.) As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd and Fe in a nickel alloy were determined by spark optical emission spectroscopy (IOES). The equipment settings were selected to maximize the analytical signals from all the elements being determined. The analysis was carried out without the use of standard samples using the calibration dependences embedded in the software of the equipment. The correctness of the obtained results was confirmed by a comparative analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry.

Keywords: optical emission spectroscopy, atomic emission spectroscopy, nickel alloys, IOES, nickel analysis, impurity determination

For citation: Alekseev A.V., Petrov P.S. Determination of impurities in nickel alloys by the method of park optical emission spectroscopy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-124-133.

Введение

В настоящее время в различных областях техники и науки активно применяют никелевые сплавы, значительную долю которых составляют жаропрочные материалы, характеризующиеся повышенной термостойкостью, жаропрочностью, длительной механической выносливостью и другими уникальными свойствами, что достигается использованием специальных технологий изготовления, а также высокой степенью легирования [1–6].

Для получения высококачественных жаропрочных никелевых сплавов необходимо контролировать не только содержание основных (легирующих) компонентов материала, но и концентрации примесных элементов, которые даже в малых количествах (<0,01 % (по массе)) оказывают негативное влияние на различные свойства выпускаемой продукции [7]. Контроль химического состава важно осуществлять как в готовом материале, так и в расплаве (экспресс-анализ), поэтому анализ должен занимать минимальное время. В данной работе определяли концентрации As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в никелевом сплаве.

Мышьяк в никелевых сплавах возможно определить методом спектрофотометрии в диапазоне концентраций от 0,0005 до 0,05 % (по массе). Навеску сплава растворяют в азотной кислоте, разбавляют водой, добавляют раствор железоаммонийных квасцов, затем проводят осаждение гидроксида железа концентрированным аммиаком. Полученный осадок растворяют в горячей воде и из раствора экстрагируют мышьяк в виде йодида путем добавления йодистого калия и четыреххлористого углерода. Далее проводят реэкстракцию в воду и путем проведения реакции с марганцовокислым калием и серно-кислым гидразином получают комплексное соединение мышьяковомолибденовой сини, имеющее светопоглощение при длине волны 750 нм [8]. Методом спектрофотометрии в никелевых сплавах также определяют железо при его массовой доле от 0,001 до 0,1 %. После растворения пробы в азотной кислоте проводят осаждение гидроксида железа насыщенным раствором аммиака. Далее осадок растворяют в разбавленной соляной кислоте и получают комплексное соединение с 1,10-фенантролином в присутствии солянокислого гидроксилamina. Светопоглощение измеряют при длине волны 510 нм [9]. Данные методики характеризуются чрезвычайно большой трудоемкостью и длительностью, а также возможностью определять одновременно только один элемент.

Более современным (по сравнению со спектрофотометрией) методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) определяют содержание кальция – от 0,03 до 0,2 % (по массе). Данный метод основан на регистрации абсорбции электромагнитного излучения (при длине волны 422,7 нм) атомами кальция при введении азотнокислого раствора пробы в пламя «ацителен–воздух» [10]. Методом ААС также определяют свинец в никелевых сплавах в содержаниях от 0,002 до 0,02 % (по массе) [11]. Однако к недостаткам ААС можно отнести возможность определять одновременно только один элемент.

Для обнаружения примесей в материалах различного состава широко используют масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) [12]. Данный метод позволяет одновременно определять большое число элементов и отличается низкими пределами обнаружения, но требует проведения длительной пробоподготовки с использованием микроволнового разложения пробы в смеси кислот, что не подходит для выполнения экспресс-анализа в течение выплавки материала.

Одним из самых распространенных современных методов анализа металлов и сплавов является искровая оптико-эмиссионная спектроскопия (ИОЭС). Данный метод основан на атомизации и термическом возбуждении свободных атомов пробы электрическим искровым разрядом и на последующей регистрации спектра испускания в оптической, ультрафиолетовой и инфракрасной областях. Эффективная температура атомизации искры

составляет ~10000 °С (при напряжении между электродами 15–40 кВ), что позволяет получать аналитические сигналы при низких содержаниях определяемых элементов. Кроме того, искровой разряд существенно стабильнее дугового и воспроизводимость результатов выше [13]. Благодаря простой и быстрой пробоподготовке, а также небольшой длительности анализа метод ИОЭС подходит для проведения экспресс-анализа.

К недостатку ИОЭС относят наложения атомных спектральных линий друг на друга, поскольку их количество может измеряться тысячами (для железа, урана) и вероятность наложений таких линий достаточно высокая. Для измерения аналитических сигналов необходимо выбирать свободные от наложений линии главной серии спектра – наиболее интенсивные из них, которые соответствуют переходам атомов из возбужденных состояний в основное. Переходы между возбужденными состояниями образуют побочные серии, а переходы из состояний выше уровня ионизации образуют непрерывный спектр, являющийся фоном в ИОЭС [14]. Большой проблемой для данного метода остается матричный эффект – влияние состава анализируемого образца на интенсивности линий определяемых элементов, вызванное различными причинами, в числе которых можно отметить следующие: неполнота испарения и атомизации пробы (сильное влияние оказывает присутствие тугоплавких элементов W, Nb и др.), процессы ионизации в искровом разряде (данный процесс конкурирует с процессом возбуждения, что снижает аналитический сигнал), поглощение одними элементами части излучения других элементов, а также явление самопоглощения [15]. Поэтому чаще всего анализ методом ИОЭС проводят с использованием стандартных образцов (СО) состава анализируемого материала с последующей коррекцией полученных градуировочных зависимостей, а при отсутствии СО применяют различные математические методы для вычисления поправок (исходя из состава анализируемой пробы) [16], преобразования спектра (преобразование Фурье, дифференцирование спектров и др.) и различные способы расчета аналитического сигнала [17]. Возможно также проведение анализа с использованием градуировочных зависимостей (которые получили для марок сплавов, близких по составу анализируемому образцу), заложенных в программное обеспечение оборудования.

Таким образом, цель данной работы – исследование возможности определения примесей As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в никелевом сплаве методом ИОЭС путем получения градуировочных зависимостей с их последующей коррекцией, а также с помощью градуировочных зависимостей, заложенных в программное обеспечение оборудования.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Аппаратура

В работе использовали искровой оптико-эмиссионный спектрометр ARL iSpark 8880 с низковольтным источником искрового разряда. Прибор оснащен двумя детекторами – фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) и прибором с зарядовой связью (ПЗС-матрица). Электрод изготовлен из высокочистого вольфрама, угол его заточки – 45 градусов, среда искрового разряда – аргон высокой чистоты. На первоначальном этапе выполняли автоматическую настройку параметров работы прибора в соответствии со стандартной процедурой подготовки к измерению, заданной производителем (табл. 1).

Таблица 1

Параметры настройки прибора

Параметр	Значение параметра
Сила тока, А	2,5
Время обыскривания, с	7,5
Время экспозиции, с	30
Частота поджигающих импульсов, Гц	400
Спектральный диапазон ФЭУ, нм	130–820
Спектральный диапазон ПЗС-матрицы, нм	200–410
Дифракционная решетка, штрихов/мм	1667

В дальнейшем четыре первых параметра варьировались для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов при анализе никелевого сплава.

Для обработки образцов перед анализом использовали станок типа 60A25 с отрезными кругами диаметром 250 мм и толщиной 1,5 мм. При подготовке поверхности проб применяли плоскошлифовальный станок с абразивными дисками на бумажной основе зернистостью 40 и 80 ед.

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации примесей использовали метод внешних стандартов, аттестованных методом ИСП-МС.

За результат измерений принимали среднее арифметическое результатов четырех параллельных измерений.

Для сравнительных испытаний и аттестации СО использовали масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP-Q (анализ выполняли из раствора).

Объекты исследования

Для построения градуировочных прямых использовали изготовленные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ сертифицированные СО состава сплава типа ВЖМ5 – ВЖМП-1, ВЖМП-2, ВЖМП-3 и ВЖМП-4. Проведен анализ производственной плавки сплава ВЖМ5. Все указанные сплавы – на никелевой основе.

Результаты и обсуждение

Перед началом анализа выбирали спектральные линии определяемых элементов с учетом их максимальной яркости, а также с минимальным числом возможных интерференций (наложений) от линий других элементов, входящих в состав анализируемого сплава [18]. Для каждого элемента выбрали несколько линий (табл. 2).

Для уменьшения влияния состава образца на аналитические сигналы от определяемых элементов применяют внутренний стандарт – элемент сравнения, чаще всего это основной компонент материала [13]. В данной работе в качестве внутреннего стандарта использовали никель (при длине волны линии эмиссии 243,8 нм), а аналитический сигнал рассчитывали следующим образом:

$$\frac{\sum I_{эл}}{I_{сп}}$$

где $\sum I_{эл}$ – сумма интенсивностей всех (приведенных в табл. 2) линий определяемого элемента; $I_{сп}$ – интенсивность линии (243,8 нм) внутреннего стандарта – никеля.

Данный способ расчета минимизирует влияние мешающих (третьих) элементов, а также увеличивает абсолютное значение аналитического сигнала, что особенно важно для определения примесей [17].

Изотопы определяемых элементов, основные интерференции и способы их подавления

Определяемый элемент	Первый потенциал ионизации, эВ	Длина волны, нм	Характеристика линии
Ca	6,11	396,8	Ближний ультрафиолет, двухзарядный ион
		393,4	
		422,7	Яркая фиолетовая
		445,5	Однозарядный ион
Fe	7,86	440,4	Группа ярких фиолетовых линий
		438,3	
		432,5	
		430,7	
		427,1	
Pb	7,41	600,2	Оранжевая
		589,6	Желтая
		560,9	
		537,2	Зеленая
As	9,81	228,8	Средний ультрафиолет
		235,0	
		278,0	
		286,0	
Zr	6,84	327,3	Ближний ультрафиолет, двухзарядный ион
		327,9	
		339,2	
		343,8	
Nb	6,76	295,1	Средний ультрафиолет
		309,4	Ближний ультрафиолет
		316,3	
		319,1	
		319,5	
La	5,58	379,5	Ближний ультрафиолет
		398,9	Ближний ультрафиолет, двухзарядный ион
		407,7	Яркая фиолетовая
		408,7	
Nd	5,52	401,2	Яркая фиолетовая
		406,1	
		403,1	
		430,4	

Подбор параметров настройки прибора

Для получения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов провели подбор параметров настройки спектрометра. В качестве анализируемой пробы использовали СО сплава ВЖМП-1, содержащий минимальные количества искомым примесей.

Осуществили также подбор времени обьскривания и экспозиции, силы тока искрового разряда и частоты поджигающих импульсов (табл. 3), для чего использовали методику, описанную в работе [19].

Обьскривание – это предварительное (до регистрации спектра) кратковременное пропускание искрового разряда через анализируемый образец с целью подавления

матричных эффектов (в частности, удаление с поверхности образца летучих мешающих примесей) и подготовки поверхности пробы к анализу. Время обыскривания подбирали с учетом достижения для всех определяемых элементов стабильного и постоянного сигнала (время «выхода на плато»).

Таблица 3

Подбор параметров настройки прибора

Параметры	Значения параметров		Шаг варьирования	Подобранное значение параметра
	минимальное	максимальное		
Время обыскривания, с	5	20	2,5	7,5
Время экспозиции, с	15	45	5	40
Сила тока, А	1	3	0,5	2,5
Частота импульсов, Гц	200	700	50	500

Далее подбирали время измерения интенсивности сигнала (время экспозиции). С одной стороны длительность данного процесса должна быть максимальной (для получения максимальных значений аналитических сигналов), однако со временем значения интенсивностей сигналов от различных элементов могут существенно изменяться, что чаще всего связано с изменением условий прохождения света через оптическую систему прибора. Поэтому оптимальное время экспозиции подбирали с учетом максимальной продолжительности стабильного сигнала для всех определяемых элементов.

Изменение силы тока искрового разряда непосредственно влияет на температуру плазмы и, как следствие, на интенсивность линий в спектре. При относительно низких температурах образуется меньше возбужденных атомов пробы, что приводит к снижению интенсивности эмиссии, а при слишком высоких температурах большая часть атомов ионизируется (образуются в том числе и двухзарядные ионы), что также приводит к снижению сигналов от определяемых элементов. В результате оптимальную силу тока (и как следствие – температуру плазмы) подбирали с учетом максимальной интенсивности аналитических сигналов для всех определяемых элементов.

Увеличение частоты искровых разрядов (частоты поджигающих импульсов) приводит к большему разогреву поверхности пробы и повышению количества вещества, поступающего в плазму, что в конечном итоге увеличивает интенсивность линий эмиссии. Однако при слишком высоких частотах происходит снижение интенсивности сигнала вследствие поглощения эмиссии большим количеством свободных невозбужденных атомов. Таким образом была подобрана оптимальная частота искровых разрядов.

Построение градуировочных зависимостей

Для построения калибровочных (градуировочных) зависимостей использовали стандартный метод наименьших квадратов. При этом получили прямые (линейные) зависимости содержания искомых элементов от интенсивности аналитических сигналов.

В табл. 4 представлены параметры найденных зависимостей в виде линейных функций, имеющих общее уравнение:

$$C = a + b \cdot I,$$

где C – концентрация элемента в образце; I – интенсивность аналитического сигнала; a и b – коэффициенты линейной регрессии.

Рассчитали также коэффициенты корреляции r (характеризующие близость полученных экспериментальных точек к рассчитанной прямой, для идеального варианта $r = 1$).

Параметры градуировочных зависимостей концентрации элемента от интенсивности аналитического сигнала

Элемент	Параметры градуировочных зависимостей		
	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>r</i>
As	108	0,25	0,82
Ca	847	1,08	0,88
Zr	2566	1,53	0,72
Pb	263	0,13	0,90
Nb	1575	1,66	0,52
La	52	0,081	0,85
Nd	234	0,12	0,63
Fe	5368	2,96	0,53

Показано, что прямое использование калибровочных зависимостей невозможно из-за влияния на интенсивности линий эмиссии других присутствующих элементов (чаще всего тугоплавких). Для преодоления данного мешающего влияния используют уравнение, учитывающее интенсивности сторонних элементов:

$$\omega = k + a \cdot I_x + b \cdot I_x^2 + c \cdot I_y,$$

где ω – содержание определяемого элемента; k – свободный член; a – коэффициент первого порядка; b – коэффициент второго порядка; c – коэффициент мешающего элемента; I_x и I_y – интенсивность линии эмиссии определяемого и мешающего (вольфрама) элементов соответственно.

Данное уравнение получено путем применения итерационного метода, используемого в программном обеспечении прибора (табл. 5).

Параметры скорректированных градуировочных зависимостей концентрации элемента от интенсивности аналитического сигнала

Элемент	Коэффициенты градуировочных зависимостей			
	<i>k</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
As	1,39	96	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$
Ca	8,05	831	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Zr	9,32	2361	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$
Fe	0,86	4862	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
Pb	7,46	308	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
Nb	4,72	1736	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
La	0,63	87	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$
Nd	5,82	165	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$

Скорректированные градуировочные зависимости учитывают интенсивность линии эмиссии определяемого и мешающего (вольфрама) элементов.

Анализ сплава типа ВЖМ5 методом ИОЭС

Далее определяли содержания As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в образце производственной плавки сплава типа ВЖМ5 методом ИОЭС с применением градуировочной и скорректированной градуировочной зависимостей, а также без использования СО (безэталонный метод), однако с помощью градуировочных зависимостей, заложенных в программное обеспечение оборудования (табл. 6).

Таблица 6

**Результаты определения содержания As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe
в образце сплава типа ВЖМ5 методом ИОЭС с применением градуировочной
и скорректированной градуировочной зависимостей, а также безэталоным методом**

Элемент	Массовая доля элементов, мкг/г, определенная с применением			
	градуировочной зависимости	скорректированной градуировочной зависимости	безэталонного метода	аттестованное значение**
As	75±6	23±4*	32±4	25±3
Ca	110±20	86±5	63±4	85±4
Zr	180±20	100±8	85±5	104±7
Pb	28±3	3±1	8±3	2±1
Nb	290±20	210±10	210±10	200±9
La	31±4	8±2	18±3	6±2
Nd	40±5	6±2	21±4	6±2
Fe	680±30	470±20	480±20	480±20

* Жирным шрифтом выделены результаты, удовлетворяющие условию точности.
** Результаты анализа, полученные методом ИСП-МС.

Из данных, представленных в табл. 6, видно, что использование скорректированных градуировочных зависимостей (уравнения множественной регрессии) позволяет получить точные значения содержаний для всех элементов (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения). Безэталонным методом точные результаты получены только для ниобия и железа.

Таким образом, для определения As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в сплаве типа ВЖМ5 методом ИОЭС необходимо использовать скорректированные градуировочные зависимости (уравнения множественной регрессии), полученные с применением СО состава никелевого сплава.

Заключение

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- для определения примесей As, Ca, Zr, Pb, Nb, La, Nd и Fe в никелевых сплавах возможно использовать метод ИОЭС;
- для определения примесных элементов методом ИОЭС необходимо проводить подбор основных параметров искрового разряда – времени обыскривания и экспозиции, силы тока и частоты поджигающих импульсов;
- для проведения точного анализа следует использовать скорректированные градуировочные зависимости (уравнения множественной регрессии), полученные с применением СО состава данной марки сплава;
- безэталонный способ с использованием градуировочных зависимостей, заложенных в программное обеспечение оборудования, подходит для определения только части элементов – ниобия и железа;
- правильность полученных результатов подтверждена сравнительным анализом методом ИСП-МС.

Список источников

1. 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. № 5. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
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. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
4. 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.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
6. 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. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.02.2023) DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
7. 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.
8. ГОСТ 6689.13–92. Никель. Сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения мышьяка. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 2–5.
9. ГОСТ 6689.5–92. Никель. Сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения железа. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 2–4.
10. ГОСТ 6689.24–92. Никель. Сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения кальция. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 2–4.
11. ГОСТ 6689.20–92. Никель. Сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения свинца. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 2–4.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.
13. Основы аналитической химии / под ред. Ю.А. Золотова. М.: Академия, 2012. 102 с.
14. Карпов Ю.А., Гимельфард Ф.А., Савостин А.П., Сальников В.Д. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. 98 с.
15. Горский Е.В., Лившиц А.М. Учет межэлементных влияний при анализе высоколегированных сталей на эмиссионном спектрометре Папуас-4 // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 26–30.
16. Popova A.N., Sukhomlinov V.S., Mustafaev A.S. Accounting for Interement in Atomic Emission Spectroscopy: A Nonlinear Theory // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 11–23.
17. Кузнецов А.А., Слептерев В.А., Пелезнев А.В. Реализация мобильных градуировочных характеристик приборов спектрального анализа материалов с использованием виртуальных эталонов // *Омский научный вестник*. 2013. № 3 (125). С. 241–246.
18. Таблицы спектральных линий / под ред. С.Л. Мандельштама, С.М. Райского. М.: ГОНТИ НКТП СССР, 1938. 321 с.
19. Кузнецов А.А., Мешкова О.Б., Слептерев В.А. Исследование факторов, влияющих на результаты измерения интенсивностей при спектральном анализе материалов // *Омский научный вестник*. 2011. № 3 (103). С. 242–245.

References

1. 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.
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. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.

4. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G. The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
5. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Letnikov M.N., Mazalov I.S. The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
6. 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 02, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
7. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Conformity assessment of new materials using high-level RM and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
8. State Standard 6689.13–92. *Nickel. Nickel and copper-nickel alloys. Methods for the determination of arsenic*. Moscow: Publishing house of standards, 1992, pp. 2–5.
9. State Standard 6689.5–92. *Nickel. Nickel and copper-nickel alloys. Methods for the determination of iron*. Moscow: Publishing house of standards, 1992, pp. 2–4.
10. State Standard 6689.24–92. *Nickel. Nickel and copper-nickel alloys. Methods for the determination of calcium*. Moscow: Publishing house of standards, 1992, pp. 2–4.
11. State Standard 6689.20–92. *Nickel. Nickel and copper-nickel alloys. Methods for the determination of lead*. Moscow: Publishing house of standards, 1992, pp. 2–4.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 137, pp. 149–155.
13. *Fundamentals of analytical chemistry*. Ed. Yu.A. Zolotova. Moscow: Academy, 2012, 102 p.
14. Karpov Yu.A., Gimelfard F.A., Savostin A.P., Salnikov V.D. *Analytical control of metallurgical production*. Moscow: Metallurgiya, 1995, 98 p.
15. Gorsky E.V., Livshits A.M. Accounting for interelement influences in the analysis of high-alloy steels on the Papuas-4 emission spectrometer. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 2, pp. 26–30.
16. Popova A.N., Sukhomlinov V.S., Mustafaev A.S. Accounting for Interelement in Atomic Emission Spectroscopy: A Nonlinear Theory. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, pp. 11–23.
17. Kuznetsov A.A., Slepterev V.A., Peleznev A.V. Implementation of mobile calibration characteristics of instruments for spectral analysis of materials using virtual standards. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, no. 3 (125), pp. 241–246.
18. *Tables of Spectral Lines*. Eds. S.L. Mandelstam, S.M. Raisky. Moscow: GONTI NKTP USSR, 1938, 321 p.
19. Kuznetsov A.A., Meshkova O.B., Slepterev V.A. Investigation of the factors influencing the results of measurement of intensities in the spectral analysis of materials. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2011, no. 3 (103), pp. 242–245.

Информация об авторах

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

Петров Павел Сергеевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Pavel S. Petrov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.01.2023.

The article was submitted 10.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 23.01.2023.