
Научная статья

УДК 669.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-133-141

АНАЛИЗ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.В. Алексеев¹, Г.В. Орлов¹, 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 Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катодах марки ВСДП-11 и ВСДП-16 на основе алюминия методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Выполнена коррекция градуировочных зависимостей с учетом наложений сигналов от мешающих элементов на аналитический сигнал и изменений интенсивности, вызываемых межэлементными влияниями в матрице. Проведен безэталоный анализ способом фундаментальных параметров. Правильность полученных результатов подтверждена сравнительным анализом методами атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентная спектроскопия, определение кремния, алюминиевые сплавы, катоды, анализ алюминия, ионно-плазменная технология, жаропрочные сплавы

Для цитирования: Алексеев А.В., Орлов Г.В., Петров П.С. Анализ катодов на основе алюминия методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-133-141.

Scientific article

ANALYSIS OF ALUMINUM-BASED CATHODES BY X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY

A.V. Alekseev¹, G.V. Orlov¹, 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. The determination of Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr and Co in the cathodes of the VSDP-11 and VSDP-16 brands based on aluminum by the method of x-ray fluorescence spectroscopy was carried out. The calibration dependences are corrected taking into account the superposition of signals from interfering elements on the analytical signal and changes in intensity caused by inter-element influences in the matrix. A standard-free analysis was carried out using the method of fundamental parameters. The correctness of the results obtained was confirmed by a comparative analysis by atomic emission spectroscopy and high-resolution mass spectrometry with a glow discharge.

Keywords: x-ray fluorescence spectroscopy, determination of silicon, aluminum alloys, cathodes, aluminum analysis, ion-plasma technology, heat-resistant alloys

For citation: Alekseev A.V., Orlov G.V., Petrov P.S. Analysis of aluminum-based cathodes by x-ray fluorescence spectroscopy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-133-141.

Введение

Современные газотурбинные двигатели и установки применяются в различных отраслях промышленности, энергетики, транспорта, при этом требуется постоянное улучшение характеристик жаропрочных материалов, используемых при производстве данных агрегатов [1, 2]. Важной задачей также является защита узлов и деталей из жаропрочных материалов от газовой (в том числе сульфидно-оксидной) коррозии при повышенных температурах (~1300 °С). Для устранения процесса коррозии, а также для улучшения других эксплуатационных характеристик на поверхность деталей из жаропрочных сплавов наносят многослойные покрытия из различных материалов. С помощью ионно-плазменной технологии первый слой покрытия получают распылением катода из кобальтового или никелевого сплава, второй слой наносят из сплава на алюминиевой основе. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводили работы с использованием катодов из нескольких сплавов на алюминиевой основе: ВСДП-11 (система Al–Si–Y), ВСДП-13 (система Al–Si–Ni–B), ВСДП-15 (система Al–Si–Cr–Y), ВСДП-16 (система Al–Ni–Y) и ВСДП-18 (система Al–Ni–Cr–Y) [3–5].

Для изготовления вышеприведенных сплавов необходимо проводить контроль их химического состава, при этом с учетом потребности в выполнении экспресс-анализа за максимально короткое время, что обусловлено технологическим процессом производства данных материалов [6]. В данной работе необходимо было провести определение Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катодах марки ВСДП-11 и ВСДП-16 на основе алюминия.

Кремний в алюминиевых сплавах при его содержании от 0,3 до 25,0 % (по массе) можно определять методом гравиметрии. Пробу разлагают гидроксидом натрия в присутствии перекиси водорода, вследствие чего в осадок выпадает кремниевая кислота. Далее проводят выпаривание с хлорной или серной кислотами. Осадок прокалывают при температуре 1100 °С, а оксид кремния удаляют при добавлении фторводородной кислоты. Полученный остаток взвешивают и по разности масс вычисляют концентрацию кремния [7]. Методом классической титриметрии в алюминиевых сплавах проводят определение хрома при содержании от 0,1 до 1,0 % (по массе). Навеску пробы растворяют в смеси серной и азотной кислот, при этом хром окисляют надсернокислым аммонием в присутствии катализатора – нитрата серебра. Затем полученный раствор титруют сульфатом железа и устанавливают точку эквивалентности с помощью индикатора – дифениламина [8]. Методом спектрофотометрии в алюминиевых сплавах определяют также железо при содержании от 0,01 до 2,0 % (по массе). Анализируемую пробу растворяют в натриевой щелочи или соляной кислоте. Железо восстанавливают до двухвалентного состояния гидрохлоридом гидроксиламина, затем добавляют 1,10-фенантролин, в результате чего образуется комплексное соединение, поглощающее свет при длине волны 510 нм [9]. Все вышеприведенные методики имеют высокую точность, однако чрезвычайно длительны и трудоемки – с их помощью одновременно определяется только один элемент.

Инструментальный метод атомно-абсорбционной спектрометрии дает возможность проводить определение меди в алюминиевых сплавах в широком диапазоне содержаний – от 0,005 до 8,0 % (по массе). Пробу растворяют в соляной кислоте, раствор разбавляют и распыляют в пламени ацетилен-воздух, измеряя абсорбцию при длине волны 324,8 нм [10]. К недостаткам данной методики можно отнести возможность определения только одного элемента.

В зарубежной научно-технической литературе описана методика одновременного определения 32 элементов (Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Ni, Zn, Ti, Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Ga, Li, Mo, Na, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Zr) в диапазоне содержаний от 0,0008 до 16,8 % (по массе) в алюминиевых сплавах методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) [11]. Пробу предварительно

растворяют в смеси соляной и азотной кислот, затем раствор разбавляют, переводят в колбу и распыляют в виде аэрозоля в потоке аргона. Далее аэрозоль попадает в плазменную горелку, где происходит эмиссия спектра всех атомов анализируемого материала, по интенсивности линий которого и вычисляют концентрации искомых элементов. Главными недостатками данного метода является необходимость проведения длительной и трудоемкой пробоподготовки, что делает невозможным проведение экспресс-анализа, а также наличие большого количества спектральных интерференций (наложений).

Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) позволяет одновременно определять большое число элементов в широких диапазонах концентраций. Этот метод основан на измерении спектров испускаемого анализируемым веществом характеристического рентгеновского излучения, возникающего вследствие электронных переходов между внутренними электронными уровнями атома, из-за чего количество линий в спектре, а как следствие и возможных спектральных наложений, значительно меньше, чем в методе ИСП-АЭС [12]. Однако основным недостатком метода РФА остается матричный эффект – влияние на интенсивность характеристического рентгеновского излучения одного элемента в присутствии других элементов [13]. Поэтому чаще всего анализ методом РФА проводят с использованием стандартных образцов состава анализируемого материала с последующей коррекцией полученных градуировочных зависимостей, а при отсутствии стандартных образцов применяют способ фундаментальных параметров [14], методика которого встроена в программное обеспечение всех современных рентгенофлуоресцентных спектрометров.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование возможности определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катодах марок ВСДП-11 и ВСДП-16 на основе алюминия методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии путем получения градуировочных зависимостей с их последующей коррекцией, а также с использованием способа фундаментальных параметров.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.1. «Монокристаллические жаропрочные суперсплавы, включая эвтектические и естественные композиты» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Аппаратура

В данной работе использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр S8 TIGER (фирма Bruker AXS, Германия). Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов выполняли автоматическую настройку параметров работы прибора в соответствии со стандартной процедурой подготовки прибора, заданной производителем (табл. 1).

Для работы проточного пропорционального счетчика использовали газовую смесь аргона с 10 % (объемн.) метана. При диспергировании эмиссионного рентгеновского излучения применяли схему Иоганссона.

Для обработки образцов перед анализом использовали отрезной станок Labotom-5 с отрезными кругами диаметром 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 ед.

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации использовали метод внешних стандартов, которые были аттестованы двумя другими методами.

Сбор и обработку данных проводили с использованием программного обеспечения рентгенофлуоресцентного спектрометра SpectraPLUS. За результат измерений

принимали среднее арифметическое результатов четырех параллельных проб (включая все стадии пробоподготовки).

Таблица 1

Параметры настройки прибора

Параметры прибора	Значения параметра
Напряжение высоковольтного генератора, кВ	30 – для легких элементов*; 60 – для тяжелых элементов
Ток высоковольтного генератора, мА	80 – для легких элементов; 40 – для тяжелых элементов
Мощность высоковольтного генератора, кВт	4,0
Материал анода рентгеновской трубки	Родий (Rh)
Кристаллы-анализаторы	LiF 200, LiF 220, XS-Ge-C, PET, XS-CEM, XS-55, XS-B
Коллиматоры, градус	0,23; 0,46; 2,0; 0,12
Коллиматорные маски, мм	34, 28, 18, 5
Детекторы	Проточный пропорциональный счетчик, сцинтилляционный счетчик
Число реплик для образца	10
Экспозиция, с	200

*Легкие элементы с атомным номером <26, тяжелые >26.

Для сравнительных испытаний и аттестации стандартных образцов использовали атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой Varian 730ES (анализ выполняли из раствора) и масс-спектрометр высокого разрешения и ионизацией в тлеющем разряде Element GD (анализ твердого образца).

Объекты исследования

Исследованы образцы катодов на алюминиевой основе марки ВСДП-11 (ВСДП-11-1, ВСДП-11-2, ВСДП-11-3, ВСДП-11-4, ВСДП-11-5, ВСДП-11-6) и марки ВСДП-16 (ВСДП-16-1, ВСДП-16-2, ВСДП-16-3, ВСДП-16-4, ВСДП-16-5, ВСДП-16-6).

Результаты и обсуждение

На начальном этапе работы для выбора аналитических линий и проведения качественного анализа получены обзорные рентгенофлуоресцентные спектры образцов катодов марок ВСДП-11 и ВСДП-16. В табл. 2 приведены оптимальные аналитические условия для анализа катодов на алюминиевой основе методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Для всех элементов выбраны аналитические линии, не имеющие наложений с линиями других элементов.

Таблица 2

Аналитические условия анализа катодов на алюминиевой основе методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии

Элемент	Аналитическая линия	Положение максимума пика угла 2 θ , градус	Режим работы рентгеновской трубки		Угол раскрытия коллиматора, градус	Тип кристалла анализатора	Тип счетчика
			напряжение, кВ	ток, мА			
Si	K α	63,614	60	29	0,23	LiF 200	Пропорциональный
Y	K β	76,816	60	135	0,23	LiF 200	Сцинтилляционный
Fe	K α	48,644	60	67	0,23	PET	Пропорциональный
Ni	K α	21,846	30	29	0,46	LiF 200	Сцинтилляционный
Cu	K β	39,089	60	67	0,23	LiF 220	Сцинтилляционный
Mg	K α	48,552	30	29	0,23	PET	Пропорциональный
Cr	K α	98,647	60	29	0,46	LiF 220	Сцинтилляционный
Co	K β	54,733	30	135	0,46	PET	Сцинтилляционный

Таким образом, подобраны условия и параметры настроек прибора для анализа катодов марок ВСДП-11 и ВСДП-16 методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Построение градуировочных зависимостей

На следующем этапе работы после анализа пяти образцов катодов марки ВСДП-11 (ВСДП-11-1, ВСДП-11-2, ВСДП-11-3, ВСДП-11-4, ВСДП-11-5) методом РФА построены градуировочные зависимости для всех искомых элементов. Содержание элементов в данных образцах предварительно установлено методом ИСП-АЭС и масс-спектрометрией высокого разрешения с тлеющим разрядом. В табл. 3 представлены параметры найденных зависимостей в виде линейных функций, имеющих общее уравнение: $C = a + b \cdot I$, где C – концентрация элемента в образце; I – интенсивность рентгеновской флуоресценции (аналитической линии); a и b – коэффициенты линейной регрессии. Рассчитаны также коэффициенты корреляции r , характеризующие близость полученных экспериментальных точек к рассчитанной прямой (для идеального варианта $r = 1$), и дисперсия регрессионной функции (s^2) [15].

Таблица 3

Параметры градуировочных зависимостей концентрации элемента от интенсивности рентгеновской флуоресценции для катодов марки ВСДП-11

Элемент	a	b	r	s^2
Si	16,78	0,0087	0,41	3,1
Y	21,08	0,0029	0,50	3,6
Fe	8,31	0,0065	0,56	9,8
Ni	13,27	0,00067	0,79	5,4
Cu	19,23	0,0066	0,54	9,2
Mg	24,15	0,0038	0,34	8,5
Cr	11,39	0,0073	0,89	10,5
Co	20,09	0,00096	0,71	7,4

Полученные значения коэффициентов корреляции и дисперсии свидетельствуют о нелинейном характере рассчитанных градуировочных зависимостей из-за сильного межэлементного (матричного) влияния и невозможности их использования при количественном элементном анализе. В этом случае при расчете концентрации каждого элемента необходимо учитывать не только интенсивность аналитической линии данного элемента, но и интенсивности линий других (мешающих) элементов. В большинстве случаев для решения данной проблемы используют уравнения множественной регрессии, имеющие общий вид:

$$C_A = a_{0A} + \sum_{j=1}^n a_j I_j + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^n a_{ji} I_i I_j + \sum_{j=1}^n a_{ji} I_j^2,$$

где C_A – концентрация определяемого элемента; a_{0A} , a_j , a_{ji} – корректирующие коэффициенты; I_i , I_j – интенсивность рентгеновской флуоресценции определяемого элемента, а также всех мешающих элементов.

Корректирующие коэффициенты подобраны с использованием программного обеспечения рентгенофлуоресцентного спектрометра с учетом интенсивностей линий всех элементов [15]. Получены следующие уравнения множественной регрессии:

$$\begin{aligned} C_{Si} &= 4,31 + 1,75 \cdot I_{Si} - 8,5 \cdot 10^{-3} I_{Si}^2 + 4,5 \cdot 10^{-2} I_{Al} + 3,1 \cdot 10^{-3} I_{Al} I_{Si} + 5,3 \cdot 10^{-3} I_{Al}^2; \\ C_Y &= -3,24 + 3,72 \cdot I_Y + 2,7 \cdot 10^{-3} I_Y^2 - 5,3 \cdot 10^{-4} I_{Al} - 7,3 \cdot 10^{-5} I_Y I_{Al} + 2,4 \cdot 10^{-3} I_{Al}^2; \\ C_{Fe} &= 6,12 - 9,25 \cdot I_{Fe} + 5,9 \cdot 10^{-3} I_{Fe}^2 - 1,5 \cdot 10^{-3} I_{Al} + 2,8 \cdot 10^{-4} I_{Fe} I_{Al} - 7,8 \cdot 10^{-4} I_{Al}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{Ni} &= -2,85 + 12,39 \cdot I_{Ni} - 3,0 \cdot 10^{-4} I_{Ni}^2 + 2,9 \cdot 10^{-3} I_{Al} + 3,5 \cdot 10^{-4} I_{Ni} I_{Al} + 6,0 \cdot 10^{-4} I_{Al}^2; \\
 C_{Cu} &= -3,81 + 24,64 \cdot I_{Cu} + 4,1 \cdot 10^{-3} I_{Cu}^2 + 3,1 \cdot 10^{-3} I_{Al} - 5,0 \cdot 10^{-3} I_{Cu} I_{Al} - 5,9 \cdot 10^{-3} I_{Al}^2; \\
 C_{Mg} &= 4,20 + 9,87 \cdot I_{Mg} - 5,8 \cdot 10^{-3} I_{Mg}^2 - 6,1 \cdot 10^{-2} I_{Al} + 8,0 \cdot 10^{-4} I_{Mg} I_{Al} - 3,8 \cdot 10^{-4} I_{Al}^2 - 8,63 \cdot I_{Si}; \\
 C_{Cr} &= -1,23 + 8,30 \cdot I_{Cr} - 4,8 \cdot 10^{-4} I_{Cr}^2 + 2,9 \cdot 10^{-3} I_{Al} + 6,1 \cdot 10^{-5} I_{Cr} I_{Al} + 5,9 \cdot 10^{-4} I_{Al}^2; \\
 C_{Co} &= 7,12 + 4,89 \cdot I_{Co} - 7,9 \cdot 10^{-4} I_{Co}^2 + 2,9 \cdot 10^{-4} I_{Al} - 6,3 \cdot 10^{-4} I_{Co} I_{Al} + 4,6 \cdot 10^{-3} I_{Al}^2.
 \end{aligned}$$

Как видно из приведенных уравнений, концентрация определяемого элемента зависит не только от интенсивности рентгеновской флуоресценции данного элемента в линейной и квадратичной зависимости, но и от интенсивности основы (матрицы) – алюминия, а для магния также от интенсивности кремния.

Аналогичные зависимости получены для катодов марки ВСДП-16.

Анализ катода марки ВСДП-11 методом РФА

Далее проведено определение Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в образце производственной плавки катода марки ВСДП-11 (система Al–Si–Y) методом РФА с применением: градуировочной зависимости, скорректированной градуировочной зависимости и способа фундаментальных параметров (табл. 4).

Таблица 4

Результаты определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катоде марки ВСДП-11 методом рентгенофлуоресцентного анализа с применением: градуировочной зависимости, скорректированной градуировочной зависимости и способа фундаментальных параметров (n = 4, P = 0,95)

Элемент	Содержание элемента, % (по массе), полученное с помощью			
	градуировочной зависимости	скорректированной градуировочной зависимости	способом фундаментальных параметров	аттестованное значение
Si	0,87±0,04	4,70±0,07*	4,21±0,07	4,75±0,08
Y	2,03±0,08	1,50±0,06	1,96±0,02	1,52±0,07
Fe	0,69±0,08	0,044±0,007	0,039±0,006	0,038±0,007
Ni	0,0004±0,0001	0,0084±0,0009	0,0081±0,0008	0,0085±0,0009
Cu	0,057±0,008	0,0044±0,0005	0,0079±0,0005	0,0041±0,0004
Mg	0,096±0,008	0,0076±0,0009	0,0052±0,0005	0,0078±0,0008
Cr	0,006±0,008	0,012±0,002	0,010±0,002	0,011±0,002
Co	0,25±0,08	0,0050±0,0006	0,010±0,002	0,0052±0,0007

* Жирным выделены результаты, удовлетворяющие условию точности.

Как видно из данных табл. 4, использование скорректированных градуировочных зависимостей (уравнения множественной регрессии) позволяет получить точные значения содержаний для всех элементов (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения).

Безэталонный способ фундаментальных параметров использует теоретически рассчитываемую прямую зависимость интенсивности линии рентгеновской флуоресценции конкретного элемента от его концентрации с учетом всех возможных параметров (уравнение Блохина–Шермана [15]). В данной работе этот способ расчета концентраций реализован с помощью программного обеспечения рентгенофлуоресцентного спектрометра с учетом интенсивностей линий всех элементов. Точные результаты получены только для хрома, никеля и железа (табл. 4), что, возможно, связано с наличием в анализируемом образце неопределяемых элементов.

Таким образом, для определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катоде марки ВСДП-11 методом РФА необходимо использовать скорректированные градуировочные зависимости (уравнения множественной регрессии), полученные с применением стандартных образцов состава кобальтовых катодов.

Анализ катода марки ВСДП-16 методом РФА

Далее проведено определение Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в образце производственной плавки катода марки ВСДП-16 (система Al–Ni–Y) методом РФА с применением: градуировочной зависимости, скорректированной градуировочной зависимости и способа фундаментальных параметров (табл. 5).

Таблица 5

Результаты определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катоде марки ВСДП-16 методом рентгенофлуоресцентного анализа с применением: градуировочной зависимости, скорректированной градуировочной зависимости и способа фундаментальных параметров ($n = 4, P = 0,95$)

Элемент	Содержание элемента, % (по массе), полученное с помощью			
	градуировочной зависимости	скорректированной градуировочной зависимости	способом фундаментальных параметров	аттестованное значение
Si	1,95±0,08	0,052±0,006*	0,12±0,01	0,056±0,007
Y	0,52±0,03	1,20±0,04	0,95±0,05	1,23±0,06
Fe	0,18±0,05	0,026±0,007	0,022±0,004	0,021±0,005
Ni	28,2±0,8	13,2±0,6	11,5±0,9	13,8±0,5
Cu	0,38±0,06	0,029±0,005	0,28±0,04	0,029±0,006
Mg	0,066±0,006	0,010±0,004	0,0096±0,0008	0,012±0,007
Cr	0,81±0,05	0,061±0,005	0,069±0,008	0,065±0,004
Co	2,5±0,3	0,012±0,002	0,0086±0,0007	0,010±0,001

* Жирным выделены результаты, удовлетворяющие условию точности.

Точные результаты (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения) для всех элементов получены только при использовании скорректированных градуировочных зависимостей (уравнения множественной регрессии). Для безэталонового метода точные результаты достигнуты для хрома и железа.

Таким образом, для определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катоде марки ВСДП-16 методом РФА необходимо использовать скорректированные градуировочные зависимости (уравнения множественной регрессии), полученные с применением стандартных образцов состава никелевых катодов.

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

– для контроля качества защитных, антикоррозионных покрытий, в частности определения Si, Y, Fe, Ni, Cu, Mg, Cr и Co в катодах марок ВСДП-11 (система Al–Si–Y) и ВСДП-16 (система Al–Ni–Y) на основе алюминия, наиболее подходящим является метод РФА;

– метод РФА позволяет одинаково эффективно проводить как химический анализ готовой продукции, так и контроль в ходе плавки материала;

– для проведения точного анализа необходимо использовать скорректированные градуировочные зависимости (уравнения множественной регрессии), полученные с применением стандартных образцов состава припоя;

– безэталоновый способ фундаментальных параметров подходит для определения только части элементов: хрома, никеля и железа в катоде марки ВСДП-11 и хрома и железа в катоде марки ВСДП-16;

– правильность полученных результатов подтверждена сравнительным анализом методами ИСП-АЭС и масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом.

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. 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.
3. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
4. Конокотин С.П., Яцюк И.В., Добрынин Д.А., Азаровский Е.Н. Влияние иттрия на качество литых заготовок из сплавов на основе алюминия // *Труды ВИАМ*. 2020. № 3 (87). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-30-40.
5. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
6. 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.
7. ГОСТ 11739.7–99. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения кремния. М.: Изд-во стандартов, 1999. С. 6–8.
8. ГОСТ 11739.21–90. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения хрома. М.: Изд-во стандартов, 1990. С. 1–3.
9. ГОСТ 11739.6–99. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения железа. М.: Изд-во стандартов, 1999. С. 1–4.
10. ГОСТ 11739.13–98. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения меди. М.: Изд-во стандартов, 1998. С. 6–8.
11. ASTM E3061-17. Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. ASTM International, 2017. P. 2.
12. Блохин М.А. Методы рентгеноспектральных исследований. М.: Гос. изд-во физ.-мат. л-ры, 1959. 388 с.
13. Handbook of x-ray spectrometry / ed. by R.E. van Grieken, A.A. Marcowicz. 2nd ed., revised and expanded. New York: Marcel Dekker Inc., 2001. P. 14–56.
14. Criss J.W., Birks L.S. Calculation methods for fluorescent X-ray spectrometry. Empirical coefficients vs. fundamental parameters // *Analytical Chemistry*. 1968. Vol. 40. P. 1080–1086.
15. Машин Н.И., Лебедева Р.В., Туманова А.Н. Рентгенофлуоресцентный анализ систем Ni–Fe–Mn–Cr // *Аналитика и контроль*. 2004. № 2. Т. 8. С. 160–164.

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. 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.
3. Muboyadzhyan S.A., Budinovskij S.A. Ion-plasma technology: prospective processes, coatings, equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
4. Konokotin S. P., Yatsyuk I. V., Dobrynin D. A., Azarovskiy E. N. Influence of yttrium on the quality of cast billets from alloys based on aluminum. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-30-40.

5. Farafonov D.P., Leshchev N.E., Afanasiev-Khodykin A.N., Artemenko N.I. Abrasive wear-resistant seal materials of the gas turbine engine flow section. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, No. 3 (56), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
6. 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.
7. State Standard 11739.7–99. *Alloys aluminum casting and deformable. Methods for the determination of silicon*. Moscow: Publishing house of standards, 1999, pp. 6–8.
8. State Standard 11739.21–90. *Alloys aluminum casting and deformable. Methods for the determination of chromium*. Moscow: Publishing house of standards, 1990, pp. 1–3.
9. State Standard 11739.6–99. *Alloys aluminum casting and deformable. Methods for the determination of iron*. Moscow: Publishing house of standards, 1999, pp. 1–4.
10. State Standard 11739.13–98. *Alloys aluminum casting and deformable. Methods for the determination of copper*. Moscow: Publishing house of standards, 1998, pp. 6–8.
11. ASTM E3061-17. *Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry*. ASTM International, 2017, p. 2.
12. Blokhin M.A. *Methods of x-ray spectral studies*. Moscow: State Publishing house of Phys.-Math. Lit., 1959, 388 p.
13. *Handbook of x-ray spectrometry*. Ed. by R.E. van Grieken, A.A. Marcowicz. 2nd ed., rev. and exp. New York: Marcel Dekker Inc., 2001. pp. 14–56.
14. Criss J.W., Birks L.S. Calculation methods for fluorescent X-ray spectrometry. Empirical coefficients vs. fundamental parameters. *Analytical Chemistry*, 1968, vol. 40, pp. 1080–1086.
15. Mashin N.I., Lebedeva R.V., Tumanova A.N. X-ray fluorescence analysis of Ni–Fe–Mn–Cr systems. *Analitika i kontrol*, 2004, no. 2, vol. 8, pp. 160–164.

Информация об авторах

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

Орлов Геннадий Васильевич, ведущий инженер, 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

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

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

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.11.2021.
The article was submitted 22.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 30.11.2021.