
Научная статья

УДК 543.51:669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-215-224

АНАЛИЗ ВОЛЬФРАМА МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

А.В. Алексеев¹, П.В. Якимович¹

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

Аннотация. *Определены примеси 34 элементов в вольфраме методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом. Описана подготовка пробы к анализу. Для достижения максимальных аналитических сигналов от всех искомых элементов выбраны соответствующие параметры настройки оборудования. Спектральные интерференции устранены с помощью применения высокого разрешения. Рассчитаны коэффициенты относительной чувствительности для всех определяемых элементов с использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии.*

Ключевые слова: *масс-спектрометрия высокого разрешения с тлеющим разрядом, вольфрам, никелевые сплавы, определение вредных примесей*

Для цитирования: Алексеев А.В., Якимович П.В. Анализ вольфрама методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 215–224. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-215-224.

Scientific article

ANALYSIS OF TUNGSTEN BY GLOW DISCHARGE HIGH-RESOLUTION MASS SPECTROMETRY

A.V. Alekseev¹, P.V. Yakimovich¹

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 impurities of 34 elements in tungsten by high-resolution glow discharge mass spectrometry was determined. The sample preparation for analysis is described. In order to achieve maximum analytical signals from all the elements corresponding equipment settings were selected. Spectral interferences were eliminated by using high resolution. Relative sensitivity coefficients for all determined elements were calculated using X-ray fluorescence spectroscopy.*

Keywords: *high resolution glow discharge mass spectrometry, tungsten, nickel alloys, determination of harmful impurities*

For citation: Alekseev A.V., Yakimovich P.V. Analysis of tungsten by glow discharge high-resolution mass spectrometry. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 215–224. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-215-224.

Введение

В настоящее время вольфрам используется в различных отраслях промышленности и науки как основа различных тугоплавких и твердых (особенно на основе карбида вольфрама) сплавов. Вольфрам также применяется как легирующая добавка при производстве жаропрочных никелевых сплавов и сталей, нержавеющей, композиционных материалов (металлокерамические сплавы) [1–5].

Для производства качественных сплавов и композиционных материалов необходимо контролировать чистоту первичного вольфрама в части содержания примесей различных элементов. Сложность данной задачи возрастает для вольфрама высокой чистоты марки ШВЧ (ТУ 48-19-57-91): предельные содержания некоторых элементов составляют 0,0001 % (по массе) [6].

Методом классической спектрофотометрии возможно определить фосфор в вольфраме в диапазоне содержаний 0,0002–0,01 % (по массе). Навеску пробы растворяют в смеси фтористоводородной и азотной кислот (в соотношении 1:1), выпаривают досуха на закрытой плитке или песчаной бане, добавляют воду и вновь выпаривают досуха. Далее к раствору приливают раствор гидроксида калия и нагревают до полного растворения осадка. Затем добавляют нитрат кальция, полученный раствор фильтруют через двойной фильтр «синяя лента», промывая гидроксидом калия. Осадок растворяют азотной кислотой, добавляют молибдат аммония и ксиленовый оранжевый, получая комплексное соединение, окрашенное в зеленый цвет. Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют при длине волны 540 нм на фотоэлектроколориметре с зеленым светофильтром в кювете с толщиной поглощающего слоя 50 мм [7].

Серу в вольфраме в диапазоне содержаний 0,0005–0,05 % (по массе) определяют фототитриметрическим методом. Анализируемый образец помещают на фарфоровую лодочку и сжигают при подаче кислорода при температуре 1200–1350 °С. Сера сгорает до сернистого газа, который затем в абсорбционном сосуде поглощается водой с образованием сернистой кислоты. Сернистую кислоту титруют раствором йода в йодистом калии в присутствии индикатора – крахмала [8]. Приведенные методики имеют высокую точность, однако характеризуются недостаточными пределами определения, чрезвычайно длительны и трудоемки.

Методом спектрального анализа определяют примеси 26 элементов в вольфраме в широких диапазонах содержаний. Для проведения анализа пробу вольфрама предварительно переводят в оксид, прокаливая образцы в муфельной печи при температуре 600–650 °С либо растворяя в перексиде водорода с последующим выпариванием и прокаливанием сухого остатка. Далее порошок оксида вольфрама смешивают с угольной смесью. Испарение пробы и возбуждение спектра проводят в дуге постоянного тока. Электрод с пробой служит анодом дуги. Затем по полученным спектрам и с использованием стандартных образцов рассчитывают содержание определяемых элементов [9]. К недостаткам метода можно отнести сложность подготовки пробы и необходимость наличия твердых стандартных образцов.

Рентгенофлуоресцентный анализ позволяет одновременно определить примеси 10 элементов в вольфраме [10]. Метод основан на измерении спектров характеристического рентгеновского излучения, испускаемого анализируемым веществом и возникающего вследствие электронных переходов между внутренними электронными уровнями атома. Подготовка проб для данного метода анализа значительно проще, чем для спектрального метода. Однако основным его недостатком остается матричный эффект – влияние на интенсивность характеристического рентгеновского излучения одного элемента в присутствии других элементов. Поэтому чаще всего рентгенофлуоресцентный анализ проводят с использованием стандартных образцов состава анализируемого материала с последующей коррекцией полученных градуировочных зависимостей.

Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой позволяет определить содержание одновременно нескольких элементов в различных материалах. Метод основан на возбуждении спектра атомов определяемых элементов индуктивно связанной плазмой с последующей регистрацией излучения спектральных линий фотоэлектрическим способом. При проведении анализа используют зависимость интенсивностей спектральных линий элементов от их массовых долей в пробе. В работе [11] определены примеси 16 элементов в вольфраме. К недостаткам этого метода можно также отнести наличие большого количества спектральных интерференций (наложений), что делает невозможным определение примесей некоторых элементов.

В настоящее время одним из наиболее популярных методов определения примесей в материалах различного состава является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) [12]. Метод позволяет одновременно определить большое количество элементов и отличается низкими пределами обнаружения, простой пробоподготовкой с использованием микроволнового разложения пробы в смеси кислот. Вместе с тем ИСП-МС имеет и ряд недостатков, основным из которых является наличие спектральных интерференций сигналов (массовых пиков) от разных элементов друг на друга, что затрудняет анализ объектов сложного состава [13]. Для решения данной проблемы используют реакционно-столкновительные ячейки, математическую коррекцию, уменьшение выходной мощности генератора плазмы и др. В работе [14] описано определение 29 примесных элементов в оксиде вольфрама методом ИСП-МС. Для снижения пределов определения использовали электротермическое испарение проб.

Наиболее подходящим методом анализа материалов высокой чистоты является масс-спектрометрия высокого разрешения с тлеющим разрядом (МСТР), позволяющая проводить полный элементный анализ в широком диапазоне концентраций непосредственно из твердого образца без длительной пробоподготовки и разбавления. Наличие масс-анализатора с двойной фокусировкой ионов высокого разрешения дает возможность преодолеть подавляющее большинство спектральных интерференций [15]. Содержание искомых элементов можно рассчитать с применением минимального количества (в большинстве случаев достаточно одного) стандартных образцов состава анализируемого материала благодаря широкому диапазону линейности и стабильности работы источника ионизации. При этом способе пробоотбора матричные эффекты меньше, чем при искровом и в индуктивно связанной плазме [16].

Цель работы – исследование возможности анализа (определение 34 элементов) вольфрама высокой чистоты марки ШВЧ (ТУ 48-19-57–91) методом МСТР путем выбора условий эксперимента и расчета коэффициентов относительной чувствительности (КОЧ) определяемых элементов с использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

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

Материалы и методы

Для исследований использовали масс-спектрометр высокого разрешения с тлеющим разрядом. Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов выполняли автоматическую настройку рабочих параметров прибора в соответствии со стандартной процедурой подготовки, заданной производителем (табл. 1). Прибор имеет три фиксированных разрешения: 300 (низкое – LR), 4000 (среднее – MR) и 10000 (высокое – HR). Это позволяет практически полностью устранить спектральные интерференции. Прибор также обладает более высокой чувствительностью по сравнению с квадрупольным масс-анализатором низкого разрешения (метод ИСП-МС).

Параметры масс-спектрометра

Параметр	Значение параметра
Источник тлеющего разряда (источник GD)	Типа Гримма (с плоским катодом), работающий в режиме «fast flow» (расход аргона составляет 100–1000 мл/мин)
Материал анода и трубки потока (позволяет определять содержание серы <2 ppm)	Особо чистый графит с пиролитическим покрытием, внутренний диаметр анода составляет 8 мм
Материал конуса интерфейса (позволяет определять содержание серы <2 ppm)	Особо чистый графит
Давление аргона в источнике тлеющего разряда	1 мбар (0,1 МПа)
Расход разрядного газа (с содержанием Ar $\geq 99,998\%$)	425 мл/мин
Ток разряда	50 мА (режим непрерывного постоянного тока)
Напряжение разряда	Не более 1400 В
Разрешение масс-анализатора	300, 4000 и 10000
Напряжение на фокусной линзе	–1200 В
Предварительный прожиг образца для удаления поверхностных загрязнений и стабилизации сигналов основы	Не менее 2 мин

Первичную обработку поверхности образцов проводили на плоскошлифовальном станке с применением алмазных абразивов (абразивы на других основах применять нельзя из-за возможного загрязнения сторонними элементами).

Сбор и обработку данных проводили с использованием программного обеспечения масс-спектрометра.

Для коррекции КОЧ использовали результаты, полученные на рентгенофлуоресцентном спектрометре. Для сравнительных испытаний применяли масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой (анализ выполняли из раствора) и газоанализатор для одновременного определения углерода и серы.

В качестве объекта исследования использовали образец вольфрама высокой чистоты марки ШВЧ (ТУ 48-19-57–91).

Результаты и обсуждение

Выбор изотопов определяемых элементов

Перед началом анализа необходимо выбрать изотопы определяемых элементов (B, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hf, Ta, Re, Tl, Pb, Bi), учитывая их максимальную распространенность для достижения наибольшего аналитического сигнала с минимальным количеством возможных интерференций (табл. 2) [13].

Разрешение прибора для каждого элемента выбирали с тем расчетом, чтобы устранить все возможные интерференции. Аналитические сигналы должны быть максимальными, так как при увеличении разрешения чувствительность прибора уменьшается.

Таблица 2

Изотопы определяемых элементов, их основные интерференции и разрешение прибора

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Мешающие ионы	Необходимое разрешение	Разрешение прибора
11B	80,18	–	–	LR
24Mg	78,99	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}^+$	1604	LR, MR
27Al	100	$^{12}\text{C}^{15}\text{N}^+$, $^{13}\text{C}^{14}\text{N}^+$	1453, 1085	LR, MR
28Si	92,2	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$, $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^+$	1557, 958	MR
31P	100	$^{15}\text{N}^{16}\text{O}^+$, $^{14}\text{N}^{16}\text{OH}^+$	1457, 967	MR
32S	95,02	$^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$	1802	MR
44Ca	2,09	$^{28}\text{Si}^{16}\text{O}^+$, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$, $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}^+$	2687, 1281, 965	MR
47Ti	7,44	–	–	LR
51V	99,75	–	–	LR
52Cr	83,79	$^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}^+$, $^{36}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$	2375, 2367	LR, MR
55Mn	100	$^{40}\text{Ar}^{15}\text{N}^+$	2248	LR, MR
56Fe	91,75	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$	2503	MR
59Co	100	$^{58}\text{NiH}^+$	5906	LR
60Ni	26,22	$^{59}\text{CoH}^+$	5853	LR
63Cu	69,17	$^{47}\text{Ti}^{16}\text{O}^+$	3687	MR
66Zn	27,9	$^{50}\text{Ti}^{16}\text{O}^+$, $^{50}\text{Cr}^{16}\text{O}^+$	4827, 4419	MR
71Ga	39,89	$^{55}\text{Mn}^{16}\text{O}^+$, $^{142}\text{Nd}^{++}$, $^{142}\text{Ce}^{++}$	8587, 2432, 2371	MR, HR
75As	100	$^{59}\text{Co}^{16}\text{O}^+$, $^{58}\text{Ni}^{16}\text{OH}^+$, $^{150}\text{Nd}^{++}$	11509, 4544, 1929	MR, HR
82Se	8,73	^{82}Kr , $^{50}\text{Ti}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$, $^{50}\text{Cr}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$, $^{40}\text{Ar}^{40}\text{Ar}^1\text{H}^1\text{H}^+$	25361 (82Se справа), 4577, 4276, 3455	MR
91Zr	11,22	$^{51}\text{V}^{40}\text{Ar}^+$	129866	LR
93Nb	100	–	–	LR
95Mo	15,92	–	–	LR
107Ag	51,84	$^{91}\text{Zr}^{16}\text{O}^+$	23494	LR
111Cd	12,80	$^{95}\text{Mo}^{16}\text{O}^+$	32332	LR
115In	95,71	$^{99}\text{Ru}^{16}\text{O}^+$, ^{115}Sn	37921, 212783	LR
119Sn	8,585	–	–	LR
121Sb	57,21	–	–	LR
126Te	18,95	$^{94}\text{Mo}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$	14987	LR
178Hf	27,28	–	–	LR
181Ta	99,99	–	–	LR
185Re	37,43	–	–	LR
205Tl	70,48	–	–	LR
207Pb	22,08	–	–	LR
209Bi	100	$^{177}\text{Hf}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$	4413	LR, MR

Расчет коэффициентов относительной чувствительности

В методе МСТР для количественной оценки результатов анализа используют КОЧ, значения которых можно получить путем анализа стандартного образца, идентичного или близкого по составу определяемой матрице. В случае отсутствия стандартного образца первоначально применяют уже имеющиеся («вшитые» в программное обеспечение масс-спектрометра) КОЧ для железной матрицы. Далее проводят анализ пробы вольфрама с использованием «вшитых» КОЧ. Полученные данные сравнивают с

результатами анализа этой же пробы методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии в режиме безэталоного анализа. Данные рентгенофлуоресцентной спектроскопии загружают в программное обеспечение масс-спектрометра, происходит автоматический расчет КОЧ всех искомым элементов для вольфрама (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты относительной чувствительности (КОЧ), рассчитанные для анализа вольфрама методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом

Элемент	КОЧ	Элемент	КОЧ	Элемент	КОЧ	Элемент	КОЧ
B	5,20	Cr	1,10	Se	4,08	Te	3,58
Mg	1,01	Mn	0,88	Zr	0,69	Hf	0,89
Al	0,95	Fe	1,00	Nb	0,93	Ta	1,40
Si	2,29	Co	1,04	Mo	0,98	Re	0,97
P	6,09	Ni	1,30	Ag	1,45	Tl	1,92
S	5,00	Cu	1,92	Cd	3,00	Pb	1,61
Ca	0,52	Zn	1,94	In	1,42	Bi	1,69
Ti	0,51	Ga	1,23	Sn	1,30		
V	0,78	As	4,19	Sb	3,62		

Далее полученные значения КОЧ использовали для расчета концентраций определяемых элементов. Для этого первоначально определяют относительную интенсивность изотопов (Ion Beam Ratio – IBR), рассчитываемую для элемента x [14]:

$$IBR_x = \frac{I_x / A_x}{\sum (I_i / A_i)},$$

где I_x – значение интенсивности изотопа определяемого элемента x (имп./с); A_x – распространенность изотопа определяемого элемента x , %. В знаменателе указана сумма значений интенсивности всех определяемых элементов пробы, а не только интенсивность матричного элемента (или внутреннего стандарта).

Далее вычисляют концентрацию определяемого элемента:

$$C_x = \frac{RSF_x}{IBR_x},$$

где RSF_x – коэффициент относительной чувствительности элемента x .

Выбор времени абляции

Для получения достоверных результатов анализа необходимо подобрать время абляции (прожига) образца тлеющим разрядом, при этом достичь полного удаления с поверхности пробы загрязнений и стабильности (выхода на плато) содержаний определяемых элементов. Проанализированы пробы исследуемого образца и рассчитаны концентрации элементов, полученные в разное время абляции. На рис. 1 представлены зависимости относительной концентрации некоторых элементов от времени абляции. Относительная концентрация элементов определяется по формуле

$$C_{отн} = C_{абс} / C_{мин},$$

где $C_{абс}$ – абсолютная концентрация элементов; $C_{мин}$ – минимальная определяемая концентрация элементов.

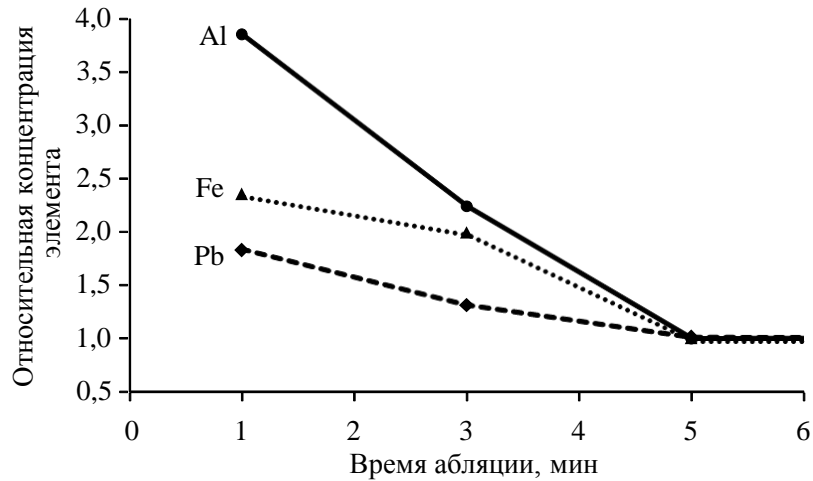


Рис. 1. Зависимости относительной концентрации элементов от времени абляции

Полное удаление с поверхности пробы загрязнений и выход на плато концентраций определяемых элементов достигаются уже после 5 мин прожига. Таким образом, для анализа вольфрама методом МСТР необходимо выполнять предварительную абляцию в течение 5 мин.

На рис. 2 представлен образец вольфрама после анализа методом МСТР.

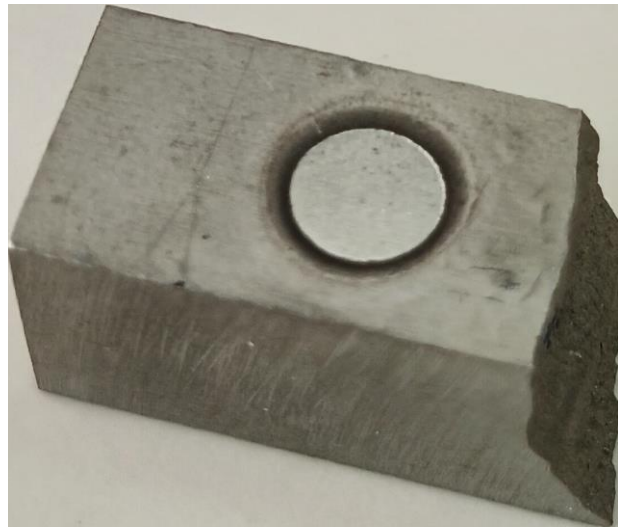


Рис. 2. Образец вольфрама после анализа методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом

Результаты анализа вольфрама

В табл. 4 представлены результаты анализа вольфрама методом МСТР. В качестве аттестованного значения указаны данные, полученные методами ИСП-МС и газового анализа (для S).

Для всех аттестованных элементов подтверждается точность полученных результатов (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения). При этом чистота кремния, рассчитанная как разница 100 % и суммы концентраций примесей, составила 99,98 % (по массе).

**Результаты определения примесей в образце вольфрама методом масс-спектрометрии
высокого разрешения с тлеющим разрядом ($n = 4, P = 0,95$)**

Элемент	Массовая доля элемента, мкг/кг		Элемент	Массовая доля элемента, мкг/кг	
	полученное значение	аттестованное значение		полученное значение	аттестованное значение
B	<0,01	<1	As	0,02±0,01	<1
Mg	0,02±0,01	<1	Se	0,06±0,02	<1
Al	0,02±0,01	<1	Zr	0,10±0,03	<1
Si	8±2	7±2	Nb	0,04±0,02	<1
P	0,09±0,03	<5	Mo	2,0±0,7	<5
S	1,0±0,3	<5	Ag	<0,01	<1
Ca	2±1	<5	Cd	<0,01	<1
Ti	1,0±0,3	<5	In	<0,01	<1
V	0,10±0,03	<1	Sn	<0,01	<1
Cr	8±2	9±2	Sb	0,05±0,02	<1
Mn	0,10±0,03	<1	Te	0,02±0,01	<1
Fe	5±2	5±3	Hf	<0,01	<1
Co	0,20±0,06	<1	Ta	0,07±0,03	<1
Ni	5±2	6±3	Re	4,0±1,0	<5
Cu	0,30±0,05	<1	Tl	0,04±0,20	<1
Zn	0,70±0,10	<1	Pb	0,30±0,09	0,20±0,10
Ga	0,20±0,07	<1	Bi	<0,01	<0,1

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- методом МСТР возможно проводить анализ вольфрама (определять примеси 34 элементов);
- для расчета КОЧ возможно использовать результаты метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии;
- время предварительной абляции должно составлять ≥ 5 мин;
- достоверность результатов анализа подтверждена данными, полученными с использованием методов ИСП-МС и газового анализа.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. 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). С. 11–18. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
3. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // *Труды ВИАМ*. 2020. № 3 (87). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
4. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 30–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.

5. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). С. 3–12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
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 14339.3–91. Вольфрам. Методы определения содержания фосфора. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 3–6.
8. ГОСТ 14339.2–82. Вольфрам. Методы определения содержания серы. М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 1–3.
9. ГОСТ 14339.5–91. Вольфрам. Методы спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 2–4.
10. ASTM B890–20. Standard test method for determination of metallic constituents of tungsten alloys and tungsten hardmetals by X-Ray fluorescence spectrometry. ASTM International, 2012. P. 1–5.
11. Brenner I., Erlich S., Vial G. et al. Direct trace element analysis of tungsten powders, alloys and related materials by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 1987. Vol. 2. P. 637–644.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.
13. Пупышев А.А., Эпова Е.Н. Спектральные помехи полиатомных ионов в методе масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Аналитика и контроль*. 2001. Т. 5. № 4. С. 335–369.
14. Medvedev N., Volzhenin A., Saprykin A. Determination of trace elements in high-purity tungsten by electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry // *Microchemical Journal*. 2020. Vol. 157. P. 1–8.
15. Jakubowski N., Prohaska T., Rottmann L., Vanhaecke F. Inductively coupled plasma- and glow discharge plasma-sector field mass spectrometry. Part I. Tutorial: Fundamentals and instrumentation // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2011. Vol. 26. P. 693–726.
16. Ганеев А.А., Губаль А.Р., Усков К.Н., Потапов С.В. Аналитическая масс-спектрометрия с тлеющим разрядом // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2012. № 4. С. 1–15.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. 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), pp. 11–18. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
3. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
4. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 30–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 3–12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.

6. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Conformity assessment of new materials using high-level CRMs and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
7. State Standard 14339.3–91. *Tungsten. Methods for determination of phosphorus content*. Moscow: Publ. house of standards, 1991, pp. 3–6.
8. State Standard 14339.2–82. *Tungsten. Methods for determination of sulfur content*. Moscow: Publ. house of standards, 1982, pp. 1–3.
9. State Standard 14339.5–91. *Tungsten. Methods of spectral analysis*. Moscow: Publ. house of standards, 1991, pp. 2–4.
10. ASTM B890–20. *Standard test method for determination of metallic constituents of tungsten alloys and tungsten hardmetals by X-Ray fluorescence spectrometry*. ASTM International, 2012, pp. 1–5.
11. Brenner I., Erlich S., Vial G. et al. Direct trace element analysis of tungsten powders, alloys and related materials by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1987, vol. 2, pp. 637–644.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 137, pp. 149–155.
13. Pupyshv A.A., Epova E.N. Spectral interference of polyatomic ions in the method of mass spectrometry with inductively coupled plasma. *Analitika i kontrol*, 2001, vol. 5, no. 4, pp. 335–369.
14. Medvedev N., Volzhenin A., Saprykin A. Determination of trace elements in high-purity tungsten by electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 2020, vol. 157, pp. 1–8.
15. Jakubowski N., Prohaska T., Rottmann L., Vanhaecke F. Inductively coupled plasma- and glow discharge plasma-sector field mass spectrometry. Part I. Tutorial: Fundamentals and instrumentation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, vol. 26, pp. 693–726.
16. Ganeev A.A., Gubal A.R., Uskov K.N., Potapov S.V. Analytical mass spectrometry with glow discharge. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*, 2012, no. 4, pp. 1–15.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию 08.09.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.09.2025.

The article was submitted 08.09.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.09.2025.