
Научная статья

УДК 543.51:669.294

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-193-202

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ТАНТАЛЕ 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. Проведено определение примесей 36 элементов в тантале методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом (МСТР). 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, МСТР, тантал, никелевые сплавы, определение вредных примесей

Для цитирования: Алексеев А.В., Якимович П.В. Определение примесей в тантале методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 193–202. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-193-202.

Scientific article

DETERMINATION OF IMPURITIES IN TANTALUM BY HIGH-RESOLUTION GLOW DISCHARGE 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. In this work the impurities of 36 elements in tantalum by high-resolution glow discharge mass spectrometry (GDMS) were determined. The sample preparation for analysis is described. The corresponding equipment settings were selected to achieve maximum analytical signals from all target elements. Spectral interferences were eliminated by using high resolution. Relative sensitivity coefficients were calculated for all determined elements using X-ray fluorescence spectroscopy.

Keywords: high resolution glow discharge mass spectrometry, GDMS, tantalum, nickel alloys, determination of harmful impurities

For citation: Alekseev A.V., Yakimovich P.V. Determination of impurities in tantalum by high-resolution glow discharge mass spectrometry. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 193–202. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-193-202.

Введение

Тантал – прочный, тугоплавкий (температура плавления 3020 °С), пластичный, коррозионно- и химически стойкий металл, широко используемый в электротехнике (в частности, при производстве электролитических конденсаторов высокой удельной мощности), при изготовлении имплантатов для хирургии (благодаря высокой биологической совместимости) и в других отраслях промышленности [1]. Данный металл также широко применяется в различных отраслях науки и техники, использующих жаропрочные и жаростойкие сплавы на различных основах, включая жаропрочные никелевые сплавы [2–7].

Проведение химического анализа металлического тантала перед его использованием при производстве различных сплавов и композиционных материалов – чрезвычайно важная задача. Решение данной задачи усложняется постоянным повышением требований к содержанию в современных сплавах микропримесей различных элементов, а также неуклонно расширяется необходимый перечень определяемых элементов [8].

Один из наиболее точных методов классической аналитической химии – спектрофотометрия [9, 10], которая основана на поглощении анализируемым веществом излучения преимущественно в оптической области спектра, однако возможен частичный переход в область мягкого ультрафиолета, а также в коротковолновый инфракрасный диапазон. Для проведения анализа пробу материала растворяют в смеси кислот и разбавляют водой. Далее к полученному раствору добавляют соответствующий комплексобразователь с образованием окрашенного продукта, имеющего поглощение при определенной длине волны, – для тантала длина волны поглощения составляет 540 нм. Затем полученное значение оптической плотности используют для расчета концентрации определяемого элемента в пробе [11].

Один из самых распространенных многоэлементных методов анализа различных материалов и сплавов – спектральный анализ, позволяющий проводить контроль содержаний 26 микропримесей тантала в широких концентрационных диапазонах. Для этого образец из тантала сначала преобразуется в оксид прокаливанием при температуре 600–650 °С или путем плавления в перекиси водорода с последующим выпариванием. Далее порошок оксида смешивается с углеродной смесью, затем испаряется, а спектр анализируют с использованием дуги постоянного тока, где электрод с образцом служит анодом. На основе полученных спектров и стандартных образцов рассчитывают концентрацию элементов [12]. При проведении вышеприведенного анализа необходимо использовать предварительно полученный порошок оксида вольфрама, что требует наличия специального оборудования и не всегда возможно, а также необходимо иметь в наличии комплект твердых (монокристаллических) стандартных образцов с различным содержанием определяемых микропримесей.

Наличие монокристаллических стандартных образцов состава анализируемого материала необходимо и при проведении анализов методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) [13]. Однако данный метод требует гораздо менее трудоемкой пробоподготовки по сравнению со спектральным анализом, а в некоторых случаях позволяет проводить полуколичественный анализ без использования стандартных образцов, что значительно ускоряет процесс исследования. К недостаткам метода РФА можно отнести наличие матричного эффекта, снижающего точность результатов анализа, а также дороговизну оборудования.

Один из методов многоэлементного анализа, не требующего наличия монокристаллических стандартных образцов, – атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Метод основан на получении и анализе атомных спектров определяемых элементов, получаемых в ходе процесса атомизации, при котором высвобождаются свободные изотопы элементов, имеющие характеристические линии

эмиссии в заданном спектре. В работе [14] определяли содержания значительного количества микропримесей в тантале с использованием большого разнообразия приемов устранения спектральных интерференций. Точность анализа методом атомно-эмиссионной спектрометрии снижается при наличии спектральных интерференций, вызванных наложением линий эмиссии мешающих элементов на линии эмиссии определяемых элементов, что делает в некоторых случаях проведение анализа невозможным.

Наряду с методом ИСП-АЭС для проведения химического анализа различных материалов и сплавов используют метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), основанный на пространственном и временном разделении ионов элементов по массам их изотопов и регистрации (уже в разделенном виде) интенсивности потока ионов искоемых элементов на фотоэлектронном умножителе [15]. Получаемые таким образом численные значения интенсивностей сигналов от определяемых элементов прямо пропорциональны концентрациям данных микропримесей в анализируемых пробах. Для построения градуировочных прямых, используемых при расчете содержаний, применяют стандартные растворы (одно- или многоэлементные) элементов с заданной концентрацией. Данные жидкие стандартные образцы более доступны, чем монокристаллические стандартные образцы, а также более универсальны в применении. При проведении анализа методом ИСП-МС (так же как и методом ИСП-АЭС) возможно появление различных спектральных интерференций, искажающих масс-спектры исследуемых материалов и, как следствие, снижающих точность результатов испытаний [16]. В работе [17] приведены данные о выявлении 29 примесных элементов в оксиде тантала с использованием метода ИСП-МС, при этом для снижения предела обнаружения использовано электротермическое испарение образцов.

Наиболее перспективный метод определения микро- и ультрамикропримесей в различных материалах и сплавах – метод масс-спектрометрии высокого разрешения с ионизацией пробы тлеющим разрядом (МСТР). Работа масс-спектрометра МСТР схожа с работой масс-спектрометра ИСП-МС за исключением различий вида пробы – в МСТР используют твердые монокристаллические пробы с минимальной подготовкой поверхности, а также вида масс-анализатора – в МСТР он состоит из двух частей – магнитной и электростатической, что дает возможность проводить разделение ионов элементов по массам их изотопов в высоком разрешении и, как следствие, в подавляющем большинстве случаев устранить возможные спектральные интерференции. С помощью метода МСТРкратно расширяется диапазон определяемых концентраций, включая основные компоненты (до 100 % по массе) и ультрамикропримеси [18]. В отличие от метода РФА, такой анализ можно проводить с использованием всего одного стандартного образца состава исследуемого материала [19].

В данном исследовании проводили анализ тантала высокой чистоты марки ЭЛП-3 по ТУ 120РК76224400-205–78 (определение 36 элементов) с оценкой возможности применения метода МСТР и различных способов повышения точности анализа, для чего использовали различные коэффициенты относительной чувствительности, а также снижения его трудоемкости путем подбора наиболее подходящей пробоподготовки образца перед анализом.

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

Методы исследования **Аппаратура**

Перед началом работы проведена процедура первоначальной настройки прибора – масс-спектрометра высокого разрешения с ионизацией пробы тлеющим разрядом –

с целью достижения наиболее оптимальных характеристик оборудования (интенсивности линий масс-спектра) в соответствии с заданной производителем программой, «вшитой» в программное обеспечение. Полученные таким способом параметры поддерживались во всех экспериментах, проводимых в ходе исследования (табл. 1). При проведении анализа для каждого определяемого элемента также выбрано разрешение масс-анализатора для устранения возможных спектральных интерференций и других помех. Низкое разрешение (LR 300) использовалось для большей части элементов и характеризуется максимальной интенсивностью аналитических сигналов, но не устраняет спектральные интерференции. Среднее разрешение (MR 4000) использовалось для меньшей части элементов, устраняло все возможные спектральные интерференции, однако приводило к снижению интенсивности аналитических сигналов. Высокое разрешение (HR 10000) не использовалось в данной работе.

Таблица 1

Условия определения элементов на масс-спектрометре

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

Для проведения качественного анализа поверхности всех исследуемых проб шлифовали на соответствующих станках для придания ровной зеркальной поверхности.

Программное обеспечение масс-спектрометра (поставляется вместе с прибором) позволило провести полный расчет содержаний определяемых элементов с использованием коэффициентов относительной чувствительности, которые могут быть получены из научно-технических литературных источников, а также при анализе вольфрама другими методами – масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (анализ выполняли из растворов) и методом газового анализа (определение серы).

Результаты и обсуждение

Выбор изотопов определяемых элементов

Элементы (B, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hf, W, Re, Tl, Pb, Bi), определяемые в данном

исследовании, существуют в виде одного либо нескольких изотопов. Изотопы разных элементов могут иметь близкие атомные массы, что необходимо учитывать при их выборе. Следует также обратить особое внимание на все возможные спектральные наложения от полиатомных ионов на ионы искоемых элементов (табл. 2) [16].

Таблица 2

Изотопы определяемых элементов, их основные интерференции и разрешение прибора

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Мешающие ионы	Необходимое разрешение	Разрешение прибора
11B	80,18	—	—	LR
23Na	85,69	—	—	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
45Sc	100	$^{29}\text{Si}^{16}\text{O}^+$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$, $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}^+$	2901, 1207, 1078, 1066	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
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, 4577, 4276, 3455	MR
89Y	100	—	—	LR
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
182W	26,50	—	—	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

Для получения точных результатов анализа, используя метод МСТР необходимо установить коэффициенты относительной чувствительности, используемые для расчета содержаний определяемых элементов исходя из полученных аналитических сигналов для данных элементов. Данные коэффициенты в общем виде заданы («вшиты») в программное обеспечение масс-спектрометра, однако они применимы лишь для начального, полуколичественного анализа. Более точные результаты могут быть получены при использовании коэффициентов для железной матрицы. Наиболее правильные значения концентраций достижимы для коэффициентов, доступных из научно-технических литературных источников, или при использовании сторонних (арбитражных) методов. В данном исследовании в качестве арбитражных методов применяли масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (анализ выполняли из растворов) и метод газового анализа (определение серы) (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты относительной чувствительности (КОЧ),
рассчитанные для анализа тантала методом МСТР**

Элемент	B	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Sc	Ti	V	Cr
КОЧ	5,20	0,95	1,01	0,95	2,29	6,09	5,00	0,52	0,59	0,51	0,78	1,10
Элемент	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Y	Zr	Nb	Mo
КОЧ	0,88	1,00	1,04	1,30	1,92	1,94	4,19	4,08	0,61	0,69	0,93	0,98
Элемент	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Hf	W	Re	Tl	Pb	Bi
КОЧ	1,45	3,00	1,42	1,30	3,62	3,58	0,89	1,61	0,97	1,92	1,61	1,69

Выбор времени предварительного прожига

На начальной стадии проведения процедуры анализа выполняется предварительный прожиг (абляция) поверхности пробы в среде аргона, в результате чего с рабочей поверхности устраняются мешающие компоненты и примеси. В процессе данной процедуры происходят заглубление пятна тлеющего разряда и стабилизация аналитических сигналов элементов основы анализируемого материала и, как следствие, сигналы от искомых примесных элементов.

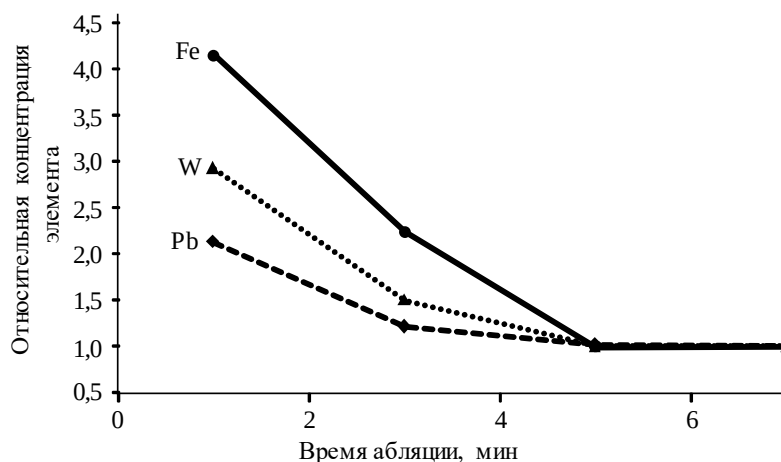


Рис. 1. Зависимости относительной концентрации элементов от времени предварительного прожига

В ходе выполнения вышеописанной процедуры подобрано оптимальное время предварительной абляции, которое составило 5 мин (рис. 1).

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



Рис. 2. Образец тантала после анализа методом МСТР

Результаты анализа тантала

Полученные результаты анализа представлены в табл. 4, из которой следует полное совпадение численных значений концентраций всех определяемых элементов для двух методов химического анализа – МСТР и РФА, что доказывает точность полученных результатов, а также эффективность метода МСТР по сравнению со всеми ранее приведенными методами анализа. Данный анализ подтверждает также применимость метода МСТР для анализа тугоплавких материалов, для которых пробоотбор тлеющим разрядом менее эффективен по сравнению с материалами из более легких элементов.

Таблица 4

Результаты определения примесей в образце тантала методом МСТР ($n = 4$, $P = 0,95$)

Элемент	Массовая доля элементов, мкг/кг		Элемент	Массовая доля элементов, мкг/кг	
	Полученное значение	Аттестованное значение		Полученное значение	Аттестованное значение
B	<0,01	<1	As	0,03±0,01	<1
Na	<0,01	<1	Se	0,05±0,02	<1
Mg	<0,01	<1	Y	0,05±0,02	<1
Al	0,02±0,01	<1	Zr	0,40±0,08	<1
Si	0,43±0,08	<1	Nb	8,1±0,9	9±2
P	0,08±0,03	<5	Mo	5,2±0,8	6±2
S	1,0±0,3	<5	Ag	<0,01	<1
Ca	3±1	<5	Cd	<0,01	<1
Sc	<0,01	<1	In	<0,01	<1
Ti	<0,01	<1	Sn	<0,01	<1
V	0,10±0,03	<1	Sb	<0,01	<1
Cr	<0,01	<1	Te	0,02±0,01	<1
Mn	<0,01	<1	Hf	<0,01	<1
Fe	<0,01	<1	W	7,4±0,7	9±2
Co	<0,01	<1	Re	<0,01	<1
Ni	4±2	5±3	Tl	<0,01	<1
Cu	0,60±0,1	<1	Pb	<0,01	<1
Zn	<0,01	<1	Bi	<0,01	<0,1

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- методом МСТР возможно проводить определение примесей 36 элементов в тантале;
- для расчета коэффициентов относительной чувствительности можно использовать результаты метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии;
- время предварительной абляции должно составлять не менее 5 мин.

Список источников

1. Омарова Д.К. Применение тантала и производство мировой танталовой продукции // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2012. № 1 (83). С. 143–148.
2. 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: 04.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.
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: 04.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 3–13. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
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). С. 11–18. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
7. 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: 04.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
8. 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.
9. ГОСТ 18904.1–89. Тантал и его окись. Фотометрический метод определения молибдена и вольфрама. М.: Изд-во стандартов, 1989. С. 6–9.
10. Luke C.L. Spectrophotometric determination of niobium in tantalum metal // Analytical Chimica Acta. 1966. Vol. 34. P. 165–168.
11. Hasegawa S., Kobayashi T., Ide K., Hasegawa R. Determination of trace amounts of sodium and potassium in high-purity tantalum by graphite-furnace atomic absorption spectrometry // Bunseki Kagaku. 1993. Vol. 42 (10). P. 643–647.
12. ГОСТ 18904.6–89. Тантал и его окись. Спектральный метод определения алюминия, ванадия, железа, кальция, кремния, магния, марганца, меди, никеля, ниобия, олова, титана, хрома и циркония. М.: Изд-во стандартов, 1989. С. 12–16.
13. Филиппов М.Н., Межевая Л.Ю., Барановская В.Б. Современные тенденции применения и аналитического контроля ниобия и тантала // Аналитика веществ и материалов. 2023. Т. 13. № 5. С. 366–378.
14. Grebneva O.N., Kubrakova I.V., Kudinova T.F., Kuzmin N.M. Direct determination of trace elements in niobium, tantalum and their oxides by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry after microwave dissolution // Spectrochimica Acta Part B. 1997. Vol. 52. P. 1151–1159.

15. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.
16. 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.
17. Kozono S., Sakamoto H., Takashi R., Haraguchi H. Multielement determination of ultratrace impurities in high purity tantalum metals by flow injection/inductively coupled plasma mass spectrometry // *Analytical Sciences*. 1998. Vol. 14 (4). P. 757–762.
18. 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.
19. 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. Omarova D.K. Application of tantalum and production of world tantalum products. *Byulleten VSNTS SO RAMN*, 2012, no. 1 (83), pp. 143–148.
2. 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: December 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
3. 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.
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: December 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 3–13. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
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), pp. 11–18. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
7. 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: December 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
8. 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.
9. State Standard 18904.1–89. *Tantalum and its oxide. Photometric method for determining molybdenum and tungsten*. Moscow: Publ. House of Standards, 1989, pp. 6–9.
10. Luke C.L. Spectrophotometric determination of niobium in tantalum metal. *Analytical Chimica Acta*, 1966, vol. 34, pp. 165–168.
11. Hasegawa S., Kobayashi T., Ide K., Hasegawa R. Determination of trace amounts of sodium and potassium in high-purity tantalum by graphite-furnace atomic absorption spectrometry. *Bunseki Kagaku*, 1993, vol. 42 (10), pp. 643–647.
12. State Standard 18904.6–89. *Tantalum and its oxide. Spectral method for determination of aluminum, vanadium, iron, calcium, silicon, magnesium, manganese, copper, nickel, niobium, tin, titanium, chromium, and zirconium*. Moscow: Publ. House of Standards, 1989, pp. 12–16.

13. Filippov M.N., Mezhevaya L.Yu., Baranovskaya V.B. Modern trends in the application and analytical control of niobium and tantalum. *Analitika veshchestv i materialov*, 2023, vol. 13, no. 5, pp. 366–378.
14. Grebneva O.N., Kubrakova I.V., Kudinova T.F., Kuzmin N.M. Direct determination of trace elements in niobium, tantalum and their oxides by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry after microwave dissolution. *Spectrochimica Acta Part B*, 1997, vol. 52, pp. 1151–1159.
15. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 137, pp. 149–155.
16. Pupyshov 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.
17. Kozono S., Sakamoto H., Takashi R., Haraguchi H. Multielement determination of ultratrace impurities in high purity tantalum metals by flow injection/inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Sciences*, 1998, vol. 14 (4), pp. 757–762.
18. 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.
19. 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.б.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 (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.02.2026.
The article was submitted 30.01.2026; approved and accepted for publication after reviewing 09.02.2026.