

Научная статья

УДК 543.51:669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-92-101

## АНАЛИЗ МОЛИБДЕНА МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

*А.В. Алексеев<sup>1</sup>, П.В. Якимович<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** *Определены примеси 43 элементов в молибдене методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом. Описана подготовка пробы к анализу. Для достижения максимальных аналитических сигналов от всех искомым элементов выбраны соответствующие параметры настройки оборудования. Спектральные интерференции устранены благодаря применению высокого разрешения. Рассчитаны коэффициенты относительной чувствительности для всех определяемых элементов с использованием метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии.*

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

**Для цитирования:** Алексеев А.В., Якимович П.В. Анализ молибдена методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-92-101.

Scientific article

## ANALYSIS OF MOLYBDENUM BY HIGH RESOLUTION GLOW DISCHARGE MASS SPECTROMETRY

*A. V. Alekseev<sup>1</sup>, P. V. Yakimovich<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal 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, we determined the impurities of 43 elements in molybdenum using high-resolution glow discharge mass spectrometry. Sample preparation for analysis is described. To achieve maximum analytical signals from all the required elements, the appropriate equipment settings have been selected. Spectral interferences are eliminated due to the use of high resolution. The relative sensitivity coefficients were calculated for all determined elements using the X-ray fluorescence spectroscopy method.*

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

**For citation:** Alekseev A.V., Yakimovich P.V. Analysis of molybdenum by high resolution glow discharge mass spectrometry. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-92-101.

## Введение

Молибден как тугоплавкий конструкционный материал, применяемый в качестве основы жаропрочных сплавов, характеризуется высокой температурой плавления, низким уровнем температурного коэффициента линейного расширения, прочностью, вдвое меньшей плотностью ( $10,2 \text{ г/см}^3$ ) по сравнению с вольфрамом и технологичностью получения сварных соединений [1–3]. Молибден также используют в качестве легирующей добавки при производстве жаропрочных никелевых сплавов и сталей, нержавеющей и композиционных материалов [4, 5].

Для производства качественных сплавов и композиционных материалов необходимо контролировать чистоту первичного молибдена в части содержания примесей множества различных элементов. Данная задача усложняется для молибдена высокой чистоты (ТУ 48-19-69–80), предельное содержание большей части элементов в котором составляет 0,0001 % (по массе) [6].

Методом классической спектрофотометрии можно определить содержание мышьяка в молибдене в диапазоне 0,005–0,05 % (по массе). Навеску пробы растворяют в смеси азотной и серной кислот, выпаривают до появления паров серной кислоты. Далее к раствору приливают соляную кислоту, добавляют бромистый калий и серноокислый гидразин, проводят дистилляцию с отгонкой хлористого мышьяка. К дистилляту хлористого мышьяка добавляют хлорномолибдатную смесь и серноокислый гидразин, получая комплексное соединение, окрашенное в синий цвет. Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют при длине волны 840 нм на спектрофотометре или в области светопропускания 590–670 нм на фотоэлектроколориметре [7].

С помощью спектрофотометрии также определяют содержание фосфора в диапазоне 0,01–0,12 % (по массе). Анализируемый образец растворяют в смеси азотной, фтористоводородной и хлорной кислот. Далее гидроксиды осаждают с помощью раствора аммиака, осадок отфильтровывают и снова растворяют в соляной кислоте. Полученную фосфорно-молибденовую гетерополикислоту восстанавливают тиомочевинной в присутствии серноокислой меди, при этом образуется комплексное соединение, окрашенное в синий цвет. Оптическую плотность измеряют при длине волны 830 нм на спектрофотометре или в области светопропускания 680–880 нм на фотоэлектроколориметре [8].

Описанные методики имеют высокую точность, однако характеризуются недостаточными пределами определения, а также чрезвычайно длительны и трудоемки.

Атомно-абсорбционная спектроскопия позволяет определить содержание меди в молибдене в диапазоне 0,1–3 % (по массе). Пробу растворяют в азотной кислоте, упаривают, разбавляют водой и измеряют абсорбцию (поглощение) растворов при длине волны 324,75 нм в пламени ацетилена и воздуха [9]. К недостаткам метода относится невозможность одновременного определения нескольких элементов и узкий диапазон измеряемых концентраций.

Атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) позволяет анализировать различные материалы, одновременно определяя сразу несколько элементов. Метод основан на возбуждении спектра атомов определяемых элементов индуктивно связанной плазмой с последующей регистрацией излучения спектральных линий фотоэлектрическим способом. Для анализа используют зависимость интенсивностей спектральных линий от массовых долей элементов в пробе. В работе [10] определены примеси 25 элементов в триоксиде молибдена с низкими значениями концентраций. Так, концентрация стронция составила  $4 \cdot 10^{-9}$  % (по массе).

Однако данный результат достигнут с помощью предварительного отделения основы пробы отгонкой в виде диоксиддихлорида молибдена ( $\text{MoO}_2\text{Cl}_2$ ), что требует наличия необходимых реактивов и специального оборудования. Отгоняемый диоксиддихлорид молибдена образуется в проточном реакторе при взаимодействии оксида молибдена с хлором при температуре 350 °С. Без применения данной трудоемкой процедуры удалось определить только 13 элементов. К недостаткам метода ИСП-АЭС также можно отнести наличие большого количества спектральных интерференций (наложений), что не позволяет определить примеси 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) [11]. Метод позволяет определить одновременно большое количество элементов и отличается низкими пределами обнаружения, простотой пробоподготовки с использованием микроволнового разложения пробы в смеси кислот. Однако 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 [12]. Для решения данной проблемы используют: реакционно-столкновительные ячейки, математическую коррекцию, уменьшение выходной мощности генератора плазмы и другие методы. В работе [13] описано определение 39 примесных элементов в оксиде молибдена методами ИСП-МС и ИСП-АЭС. Для устранения спектральных интерференций применяли предварительную экстракцию молибдена из солянокислых растворов 5-п-пентилтио-8-гидроксихинолином, органическую и водную фазы разделяли, анализ проводили в водной фазе. При этом часть элементов (W, Ta, Nb, Pd), как и молибден, полностью переходят в органическую фазу, их определение методом ИСП-МС становится невозможным.

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 позволяет преодолевать подавляющее большинство спектральных интерференций [14]. 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 таком способе пробоотбора матричные эффекты меньше, чем при искровом и в индуктивно связанной плазме [15].

Цель данной работы – исследование возможности анализа (определение 43 элементов) молибдена высокой чистоты марки МШЧ-1 (ТУ 48-19-69–80) методом МСТР путем выбора условий анализа 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 исследования использовали масс-спектрометр высокого разрешения с тлеющим разрядом. Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов рабочие параметры прибора настраивали автоматически 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), что позволяет практически полностью устранить спектральные интерференции; обладает более высокой чувствительностью по сравнению с квадрупольным масс-анализатором низкого разрешения (метод ИСП-МС).

Таблица 1

**Условия определения элементов на масс-спектрометре высокого разрешения**

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 определить содержание серы <2 ppm)	Особо чистый графит с пиролитическим покрытием, внутренний диаметр анода составляет 8 мм
Материал конуса интерфейса (позволяет определить содержание серы <2 ppm)	Особо чистый графит
Давление аргона в источнике тлеющего разряда	1 мбар (0,1 МПа)
Расход разрядного газа ( $Ar \geq 99,998 \%$ )	425 мл/мин
Ток разряда	50 мА (режим непрерывного постоянного тока)
Напряжение разряда	$\leq 1400$ В
Разрешение масс-анализатора	300; 4000; 10000
Напряжение на фокусной линзе	-1200 В
Предварительный прожиг образца для удаления поверхностных загрязнений и стабилизации сигналов основы	$\geq 2$ мин

Первичную обработку поверхности образцов проводили на плоскошлифовальном станке с применением алмазных абразивов (абразивы на других основах применять нельзя из-за возможного загрязнения поверхности образца сторонними элементами). Поскольку размеры образца были недостаточными для проведения анализа, он запрессован в токопроводящую смолу.

Сбор и обработку данных проводили, используя программное обеспечение масс-спектрометра высокого разрешения.

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

**Результаты и обсуждение***Выбор изотопов определяемых элементов*

Перед началом анализа необходимо выбрать изотопы определяемых элементов (Li, Be, B, C, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, In, Sn, Sb, Te, Hf, Ta, W, Re, Tl, Pb, Bi) с учетом их распространенности для достижения максимального аналитического сигнала с минимальным числом возможных интерференций (табл. 2) [12].

## Изотопы определяемых элементов, их основные интерференции и разрешение прибора

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Мешающие ионы	Необходимое разрешение	Разрешение прибора
7Li	72,36	–	–	LR
9Be	100	–	–	LR
11B	80,18	–	–	LR
12C	98,89	–	–	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
39K	87,87	–	–	LR
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
71Ga	39,89	$^{55}\text{Mn}^{16}\text{O}^+$ , $^{142}\text{Nd}^{++}$ , $^{142}\text{Ce}^{++}$	8587, 2432, 2371	MR, HR
73Ge	7,72	$^{57}\text{Fe}^{16}\text{O}^+$ , $^{146}\text{Nd}^{++}$	10646, 2203	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	$^{82}\text{Kr}$ , $^{50}\text{Ti}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$ , $^{50}\text{Cr}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^+$ , $^{40}\text{Ar}^{40}\text{Ar}^{1}\text{H}^1\text{H}$ +	25361 (82Se справа), 4577, 4276, 3455	MR
85Rb	87,41	–	–	LR
88Sr	78,92	–	–	LR
89Y	100	–	–	LR
91Zr	11,22	$^{51}\text{V}^{40}\text{Ar}^+$	129866	LR
93Nb	100	–	–	LR
107Ag	51,84	$^{91}\text{Zr}^{16}\text{O}^+$	23494	LR
115In	95,71	$^{99}\text{Ru}^{16}\text{O}^+$ , $^{115}\text{Sn}$	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
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

Разрешение прибора для каждого элемента выбирали таким образом, чтобы устранить все возможные интерференции. При этом аналитические сигналы должны быть максимальными, так как при увеличении разрешения чувствительность прибора уменьшается.

*Расчет коэффициентов относительной чувствительности*

Для количественной оценки результатов анализа, полученных методом МСТР, используют КОЧ, значения которых определяют, анализируя стандартный образец, идентичный или близкий по составу определяемой матрице. Если стандартный образец отсутствует, первоначально используют имеющиеся («вшитые» в программное обеспечение масс-спектрометра) КОЧ для железной матрицы. Пробы молибдена анализируют с использованием «вшитых» значений КОЧ, полученные данные сравнивают с результатами безэталонного анализа этой же пробы методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Данные рентгенофлуоресцентной спектроскопии загружают в программное обеспечение масс-спектрометра, КОЧ всех искомым элементов для молибдена рассчитывают автоматически (табл. 3).

Таблица 3

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

Элемент	КОЧ	Элемент	КОЧ	Элемент	КОЧ
Li	0,99	Mn	0,63	Ag	2,41
Be	3,83	Fe	0,74	Sn	0,81
B	4,06	Co	0,65	Ga	1,46
C	7,69	Ni	0,94	Te	2,77
Na	1,54	Cu	1,53	Hf	0,49
Mg	0,94	Zn	2,39	Ta	0,78
Si	1,90	Ge	0,83	W	1,01
P	2,29	As	3,21	Re	0,61
S	2,14	Se	2,36	Tl	2,55
Ca	0,28	Rb	1,16	Pb	0,85
Sc	0,37	Sr	1,29	Bi	1,84
Ti	0,31	Y	0,34	In	0,91
V	0,34	Zr	0,35	Sb	3,06
Cr	0,80	Nb	0,58	K	2,09

Полученные значения КОЧ использовали для расчета концентраций определяемых элементов. Для этого определяли относительную интенсивность изотопов – значение IBR (Ion Beam Ratio), рассчитываемое для элемента  $x$  [14]:

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

где  $I_x$  – интенсивность изотопа определяемого элемента  $x$ , имп./с;  $A_x$  – распространенность изотопа определяемого элемента  $x$ , %.

В знаменателе данного уравнения указана сумма значений интенсивности всех определяемых элементов пробы, а не только интенсивность матричного элемента (или внутреннего стандарта). Далее вычисляли 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 важно полностью удалить загрязнения с поверхности пробы и достичь постоянства (выхода на плато) содержания 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, которые определяются по формуле

$$C_{\text{отн}} = C_{\text{абс}}/C_{\text{мин}}$$

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

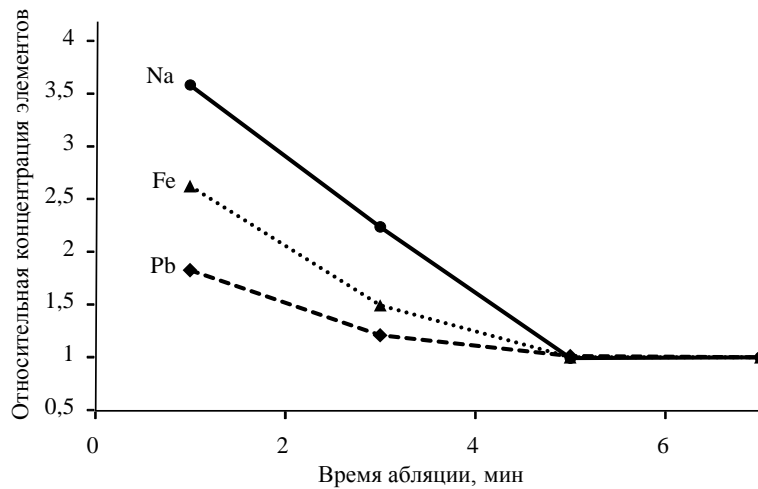


Рис. 1. Зависимости относительной концентрации элементов от времени абляции

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

На рис. 2 представлен образец молибдена в токопроводящей смоле после анализа методом масс-спектрометрии с тлеющим разрядом.

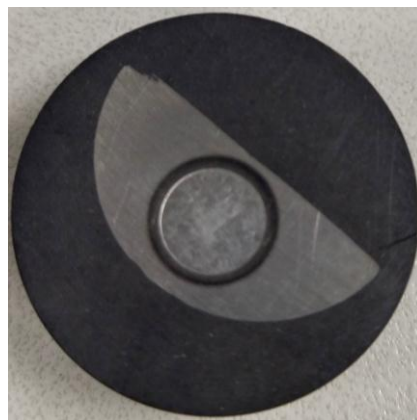


Рис. 2. Образец молибдена в токопроводящей смоле после анализа методом масс-спектрометрии с тлеющим разрядом

### Результаты и обсуждение

В табл. 4 представлены результаты анализа молибдена методом МСТР. В качестве аттестованного значения представлены результаты анализа методами ИСП-МС и газового анализа (для углерода и серы).

Таблица 4

**Массовая доля примесей в образце молибдена, определенная методом масс-спектрометрии 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
Li	<0,2	<1	Se	3±1	<4
Be	<0,03	<1	Rb	0,5±0,1	<1
B	0,12±0,03	<1	Sr	0,3±0,1	0,3±0,1
C	21±2	20±3	Y	<0,05	<0,1
Na	18±2	17±2	Zr	0,12±0,03	<1
Mg	0,2±0,1	<1	Nb	0,9±0,3	<1
Si	11±2	13±3	Ag	<1	<1
P	3±1	4±1	In	<1	<1
S	0,21±0,05	<1	Sn	1,2±0,2	1,3±0,3
K	0,35±0,08	<1	Sb	0,4±0,1	0,3±0,1
Ca	6±1	5±2	Te	<2	<2
Sc	<0,05	<1	Hf	0,2±0,1	<1
V	2,5±0,2	2,4±0,3	Ta	0,14±0,05	<1
Cr	63±8	60±9	W	810±10	810±10
Mn	0,16±0,03	<1	Re	2,2±0,2	2,3±0,3
Fe	160±10	165±10	Tl	<0,1	<0,1
Co	0,8±0,2	<1	Pb	<0,1	<0,1
Ni	46±7	45±8	Bi	<0,1	<0,1
Zn	0,14±0,02	<1	Al	7±2	6±2
Ga	<0,2	<1	Ti	2,4±0,2	<3
Ge	<0,4	<1	Cu	0,6±0,1	<1
As	0,7±0,2	<3			

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

### Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- методом МСТР можно проводить анализ молибдена (определять примеси 43 элементов);
- для расчета КОЧ можно использовать результаты метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии;
- время предварительной абляции должно составлять  $\geq 5$  мин;
- достоверность полученных результатов подтверждена сравнительным анализом данных, полученных методами 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. № S. 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). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). 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). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2023). 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). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). 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). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.12.2023). 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 13151.11–77. Ферромолибден. Метод определения содержания мышьяка. М.: Изд-во стандартов, 1977. С. 1–4.
8. ГОСТ 13151.6–94. Ферромолибден. Метод определения фосфора. М.: Изд-во стандартов, 1994. С. 1–6.
9. ГОСТ 13151.7–82. Ферромолибден. Методы определения меди. М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 3–4.
10. Цыганкова А.Р., Макашова Г.В., Шелпакова И.Р., Сапрыкин А.И. Анализ триоксида молибдена методом ИСП-АЭС // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15. № 2. С. 182–186.
11. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.
12. 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.
13. Карандашев В.К., Туранов А.Н., Носенко С.В. Анализ оксида молибдена методами атомной эмиссии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Журнал аналитической химии*. 2011. Т. 66. № 1. С. 40–46.
14. 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.
15. 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), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.

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), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
4. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Kara-shaew 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), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
6. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Assessing the conformity of new materials using high-level RM and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
7. State Standart 13151.11–77. *Ferromolybdenum. Method for determining arsenic content*. Moscow: Standards Publishing House, 1977, pp. 1–4.
8. State Standart 13151.6–94. *Ferromolybdenum. Phosphorus determination method*. Moscow: Publishing house of standards, 1994, pp. 1–6.
9. State Standart 13151.7–82. *Ferromolybdenum. Methods for determining copper*. Moscow: Publishing house of standards, 1982, pp. 3–4.
10. Tsygankova A.R., Makashova G.V., Shelpakova I.R., Saprykin A.I. Analysis of molybdenum trioxide by ICP-AES. *Analitika i kontrol*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 182–186.
11. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS. *Mikrochimica Acta*, 2001, vol. 137, pp. 149–155.
12. Pupyshv A.A., Epova E.N. Spectral interference of polyatomic ions in the inductively coupled plasma mass spectrometry method. *Analitika i kontrol*, 2001, vol. 5, no. 4, pp. 335–369.
13. Karandashev V.K., Turanov A.N., Nosenko S.V. Analysis of molybdenum oxide by atomic emission and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2011, vol. 66, no. 1, pp. 40–46.
14. 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.
15. 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**, научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Якимович Павел Витальевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Andrey V. Alekseev**, Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel V. Yakimovich**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.01.2024.

The article was submitted 29.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 10.01.2024.