

Научная статья

УДК 543.51:669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-101-110

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

А.Н. Безносюк¹, А.В. Алексеев¹

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

Аннотация. *Определены примеси металлов платиновой группы (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) и золота в сложнoleгированных никелевых сплавах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Приведена методика растворения и подготовки пробы к анализу. Спектральные интерференции устранены с помощью реакционно-столкновительной ячейки и методом математической коррекции. Достоверность результатов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой подтверждена путем сравнительного анализа с данными, полученными методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом.*

Ключевые слова: *масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, металлы платиновой группы, определение вредных примесей, микроволновая пробоподготовка*

Для цитирования: Безносюк А.Н., Алексеев А.В. Определение элементов платиновой группы в никелевых сплавах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-101-110.

Scientific article

DETERMINATION OF PLATINUM GROUP ELEMENTS IN NICKEL ALLOYS BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA MASS SPECTROMETRY METHOD

A.N. Beznosyuk¹, A.V. Alekseev¹

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 work determined the impurities of platinum group metals (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) and gold in complex-alloyed nickel alloys using inductively coupled plasma mass spectrometry. The method for dissolving a sample and preparing it for analysis is presented. Spectral interferences are eliminated using a reaction-collision cell and a mathematical correction method. The accuracy of the results was confirmed by comparative analysis with data obtained using high-resolution mass spectrometry with a glow discharge.*

Keywords: *inductively coupled plasma mass spectrometry, platinum group metals, determination of harmful impurities, microwave sample preparation*

For citation: Beznosyuk A.N., Alekseev A.V. Determination of platinum group elements in nickel alloys by inductively coupled plasma mass spectrometry method. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-101-110.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы являются одним из наиболее важных материалов современного двигателестроения, из которого производят ответственные узлы и детали газотурбинных двигателей, газоперекачивающих установок [1–4]. Для достижения необходимых и во многом уникальных свойств в состав никелевых сплавов включают множество различных элементов (Cr, Co, Al, Ti, W, Ta, Mo, Nb и т. д.), в том числе металлы платиновой группы [5, 6]. Кроме того, некоторые металлы платиновой группы необходимо определять в жаропрочных никелевых сплавах типа Inconel в виде примесей с содержанием <1 мкг/г, что является чрезвычайно важной задачей для обеспечения производства качественных материалов [7].

Методом спектрального анализа можно определить платину, палладий, золото, родий (в диапазоне содержаний 0,001–0,1 % (по массе)) и иридий (в диапазоне содержаний 0,005–0,1 % (по массе)) [8]. Исследуемый образец помещают в кратер графитового электрода. Металл испаряется в дуге переменного и постоянного токов, в результате чего получают эмиссионные спектры, которые фотографируют на спектрографе. Концентрации определяемых элементов рассчитывают с помощью градуировочных графиков, полученных после анализа стандартных образцов. Данная методика не позволяет определить металлы платиновой группы и золото с содержанием $<0,001$ % (по массе), а также требует наличия градуировочных (стандартных) образцов в виде порошка.

К методам, не требующим длительной и трудоемкой пробоподготовки, относится рентгенофлуоресцентная спектроскопия, основанная на получении и анализе эмиссионных спектров в рентгеновской области. Так, в работе [9] с помощью данного метода в автомобильных катализаторах определены платина, палладий и родий. К недостаткам рентгенофлуоресцентной спектроскопии можно отнести необходимость применения стандартных образцов (которые предварительно должны быть аттестованы другим методом) и недостаточные пределы обнаружения определяемых элементов.

Одним из методов, позволяющих выявить металлы платиновой группы с содержанием <1 мкг/г, является атомно-абсорбционная спектроскопия. В работе [10] приведены результаты определения платины, палладия и родия в объектах окружающей среды. Пробы предварительно растворяли в смеси азотной и плавиковой кислот, далее растворы помещали в графитовую кювету и проводили электротермическую атомизацию с последующим измерением абсорбции (поглощения) атомами палладия, платины и родия при длине волны 247,6; 266,0 и 343,5 нм соответственно. Метод атомно-абсорбционной спектроскопии позволяет определить одновременно только один элемент и отличается трудоемким подбором условий атомизации.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой можно выявить одновременно большое количество элементов в различных материалах с низкими пределами обнаружения [11]. Для пробоподготовки используется микроволновое разложение в смеси кислот. Основным недостатком метода является межэлементное влияние, связанное с наложением сигналов ионов разных элементов (в особенности от полиатомных ионов) с одинаковым соотношением массы и заряда (m/z), что делает анализ образцов сложного состава чрезвычайно трудной задачей. Данную проблему можно решить с помощью использования реакционно-столкновительной ячейки [12], которой оснащены большинство современных масс-спектрометров, и путем проведения математической коррекции [13].

Следует отметить, что описанных недостатков лишена масс-спектрометрия высокого разрешения, позволяющая преодолеть возможные спектральные

интерференции [14]. Однако высокая стоимость оборудования ограничивает применение данного метода.

Цель данной работы – исследование возможности определения элементов платиновой группы и золота в сложнолегированных (легированных Co, W, Ta, Mo, Hf, Zr) никелевых сплавах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой путем преодоления спектральных интерференций различными способами и выбора оптимальных условий измерений.

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

Материалы и методы

Аппаратура

Для исследования использован масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой. Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов выполнена автоматическая настройка параметров работы прибора в соответствии со стандартной процедурой, заданной производителем:

Расход газа, л/мин:	
плазмообразующего	13,8
вспомогательного	0,80
распылительного	0,96
Скорость перистальтического насоса, мин ⁻¹	40
Глубина плазмоотбора, мм	5
Мощность RF-генератора, Вт	1400
Количество, ед.:	
каналов на массу	1
сканов в реплике	50
реплик для образца	3
Продолжительность интегрирования, с	0,01
Напряжение, В:	
на экстракторе	164
на фокусной линзе	3,6
Разрешение, а. е. м.	0,7
Распылитель	Микропоточный, концентрический (400 мкл/мин)
Распылительная камера	Кварцевая, циклонная с термоэлектрическим охлаждением
Температура распылительной камеры, °С	2,7
Самплер	Стандартный никелевый
Скиммер	Стандартный никелевый со вставкой 3,5 мм

Для настроечного раствора, содержащего Li, In, Ba, Ce, U с концентрацией 1 мкг/дм³, чувствительность составила, имп/с/(мкг/дм³) (не менее): 60000 – ⁷Li, 250000 – ¹¹⁵In, 400000 – ²³⁸U. Уровень оксидных ионов ¹⁴⁰CeO⁺/¹⁴⁰Ce и двухзарядных ионов ¹³⁷Ba²⁺/¹³⁷Ba не превышал 2,0 и 2,5 % соответственно.

Работа реакционно-столкновительной ячейки с гелием в режиме дискриминации по кинетической энергии (KED и KEDS) позволяет избежать возникновения новых интерференций, которые возникают при использовании реакционноспособных газов, что позволяет анализировать образцы со сложной матрицей и переменным составом [12]. Проведена первичная настройка работы реакционно-столкновительной ячейки по встроенной в программное обеспечение прибора процедуре. При этом напряжение на

входе в квадруполь «Pole Bias» и выходе из ячейки «CCT Bias» Bias» составило 18 и 21 В соответственно. Расход гелия через ячейку подобран вручную, для режима работы KED составил 5,5 мл/мин, при этом достигнуто влияние оксидных ионов $^{140}\text{CeO}^+ / ^{140}\text{Ce} = 0,2\%$. Для режима работы KEDS расход гелия через ячейку составил 8,3 мл/мин при нулевом сигнале CeO^+ . Таким образом, в экспериментах использовали три режима работы масс-спектрометра: стандартный режим без применения реакционно-столкновительной ячейки (STD) и два режима с использованием ячейки (KED и KEDS), отличающиеся уровнем расхода гелия.

Пробы растворяли с помощью системы микроволновой пробоподготовки с тефлоновыми автоклавами объемом 100 см³. Для сравнительных испытаний использовали масс-спектрометр высокого разрешения с ионизацией в источнике тлеющего разряда.

Реагенты и объекты исследования

Для растворения проб использовали азотную кислоту (особо чистую), очищенную с помощью системы перегонки без кипения, и плавиковую кислоту (особо чистую) с концентрацией 40 % (по массе). В качестве растворителя применяли деионизованную воду (сопротивление $\geq 18,2$ МОм). В качестве внутреннего стандарта, который вводили вручную, использовали раствор индия с концентрацией 2 мкг/л, приготовленный из стандартных растворов с концентрацией 1 г/л. При построении градуировочных графиков для аналитического определения использовали стандартные растворы рутения, родия, палладия, осмия, иридия, платины и золота с концентрацией 1 мг/л.

Объектом анализа выбран жаропрочный никелевый сплав, легированный кобальтом, вольфрамом, танталом, молибденом, гафнием и цирконием. В качестве плазмообразующего, распылительного и вспомогательного газа использовали аргон с чистотой 99,998 %, а в качестве газа реакционно-столкновительной ячейки – гелий с чистотой 99,999 %.

Пробоподготовка образцов

Образцы никелевого сплава массой по 0,5 г (четыре параллельные пробы) растворяли в 20 мл воды, 8 мл HNO_3 и 2 мл HF . Вода необходима для лучшего растворения получаемых в процессе разложения солей, а также для равномерного распределения микроволновой мощности. Сначала к образцу добавили воду, далее плавиковую кислоту и затем азотную кислоту. Автоклавы нагревали в микроволновой системе до температуры 160 °С в течение 20 мин, затем еще 20 мин поддерживали температуру 160 °С. Максимальная мощность нагрева задана из расчета 150 Вт на автоклав, предельное давление – не более 20 ат (2 МПа). Полученный раствор довели до объема 100 мл и разбавили до концентрации 0,5 г/л по матрице, далее использовали непосредственно для измерения.

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации элемента использовали метод добавок, при котором известные содержания определяемых элементов вводят как добавки непосредственно в анализируемый образец. Внутренний стандарт применяли для коррекции дрейфа сигнала при измерении и устранения матричного влияния компонентов основы на интенсивность сигналов определяемых элементов. Сбор и обработку данных проводили, используя программное обеспечение масс-спектрометра.

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

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлена большая часть (за исключением самых малораспространенных (<1 %)) изотопов определяемых элементов с возможными спектральными интерференциями (наложениями) от одноатомных и полиатомных ионов легирующих элементов, никеля и аргона (приведены мешающие ионы только с самыми распространенными изотопами элементов) [15].

Таблица 1

Изотопы определяемых элементов и их основные интерференции

Определяемый элемент	Изотоп*	Распространенность изотопа, %	Мешающие ионы
Ru	⁹⁶ Ru	5,52	⁹⁶ Zr ⁺ , ⁹⁶ Mo ⁺
	⁹⁸ Ru	1,87	⁹⁸ Mo ⁺ , ⁵⁸ Ni ⁴⁰ Ar ⁺
	⁹⁹Ru	12,76	⁵⁹ Co ⁴⁰ Ar ⁺⁶² , ⁹⁸ MoH ⁺
	¹⁰⁰ Ru	12,60	¹⁰⁰ Mo ⁺ , ⁶⁰ Ni ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰¹ Ru	17,06	⁶¹ Ni ⁴⁰ Ar ⁺ , ⁶⁴ Ni ³⁷ Cl ⁺
	¹⁰² Ru	31,55	¹⁰² Pd ⁺ , ⁶² Ni ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰⁴ Ru	18,62	¹⁰⁴ Pd ⁺ , ⁶⁴ Ni ⁴⁰ Ar ⁺
Pd	¹⁰² Pd	1,02	¹⁰² Ru ⁺ , ⁶² Ni ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰⁴ Pd	11,14	¹⁰⁴ Ru ⁺ , ⁶⁴ Ni ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰⁵Pd	22,33	⁶⁵ Cu ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰⁶ Pd	27,33	⁹⁰ Zr ¹⁶ O ⁺ , ⁶⁶ Zn ⁴⁰ Ar ⁺
	¹⁰⁸ Pd	26,46	⁹² Zr ¹⁶ O ⁺ , ⁹² Mo ¹⁶ O ⁺
	¹¹⁰ Pd	11,72	⁹⁴ Zr ¹⁶ O ⁺ , ⁹⁴ Mo ¹⁶ O ⁺
Rh	¹⁰³Rh	100,00	⁶³ Cu ⁴⁰ Ar ⁺
Os	¹⁸⁶ Os	1,59	¹⁸⁶ W ⁺
	¹⁸⁷ Os	1,96	¹⁸⁶ WH ⁺
	¹⁸⁸ Os	13,24	⁹⁶ Mo ⁹⁶ Mo ⁺
	¹⁸⁹Os	16,15	–
	¹⁹⁰ Os	26,26	¹⁷⁴ Hf ¹⁶ O ⁺
	¹⁹² Os	40,78	¹⁷⁶ Hf ¹⁶ O ⁺
Ir	¹⁹¹Ir	37,27	¹⁷⁴ Hf ¹⁶ OH ⁺
	¹⁹³Ir	62,73	¹⁷⁷ Hf ¹⁶ O ⁺
Pt	¹⁹⁴Pt	32,97	¹⁷⁸ Hf ¹⁶ O ⁺ , ¹⁷⁷ Hf ¹⁶ OH ⁺
	¹⁹⁵Pt	33,83	¹⁷⁹ Hf ¹⁶ O ⁺ , ¹⁷⁸ Hf ¹⁶ OH ⁺
	¹⁹⁶ Pt	25,24	¹⁸⁰ Hf ¹⁶ O ⁺ , ¹⁸⁰ W ¹⁶ O ⁺
	¹⁹⁸ Pt	7,16	¹⁸² W ¹⁶ O ⁺ , ¹⁹⁸ Hg ⁺
Au	¹⁹⁷Au	100,00	¹⁸⁰ Hf ¹⁶ OH ⁺ , ¹⁸¹ Ta ¹⁶ O ⁺

* Полу жирным шрифтом выделены изотопы элементов, выбранные для дальнейших исследований.

Наибольшую сложность представляют наложения от одноэлементных ионов (изобарные наложения), поскольку их влияние нельзя устранить с помощью реакционно-столкновительной ячейки с гелием в режиме дискриминации по

кинетической энергии (KED и KEDS). Поэтому изотопы, имеющие данные интерференции, исключены из дальнейших исследований. Наиболее предпочтительны изотопы, свободные от наложений полиатомных ионов, содержащих никель с аргоном, поскольку анализ проводится в никелевой матрице и с ионизацией в аргоновой плазме, а также изотопы, имеющие наложения от меньшего количества элементов. Таким образом, для дальнейшей работы выбраны следующие изотопы: ^{99}Ru , ^{105}Pd , ^{103}Rh , ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{193}Ir , ^{194}Pt , ^{195}Pt , ^{197}Au .

Выбор режима работы масс-спектрометра

На следующем этапе проанализированы растворы легирующих компонентов никелевых сплавов в концентрациях, соответствующих их содержанию в анализируемом материале (табл. 2), с измерением интенсивности сигнала для выбранных масс изотопов (при этом концентрация и состав кислот соответствовали холостому раствору).

Таблица 2

Концентрации легирующих элементов никелевых сплавов в растворах

Элемент	Концентрация в анализируемом растворе, мг/л	Соответствующая концентрация в сплаве, % (по массе)
Co	50	10
W	35	7
Ta	20	4
Mo	10	2
Hf	10	2
Zr	5	1

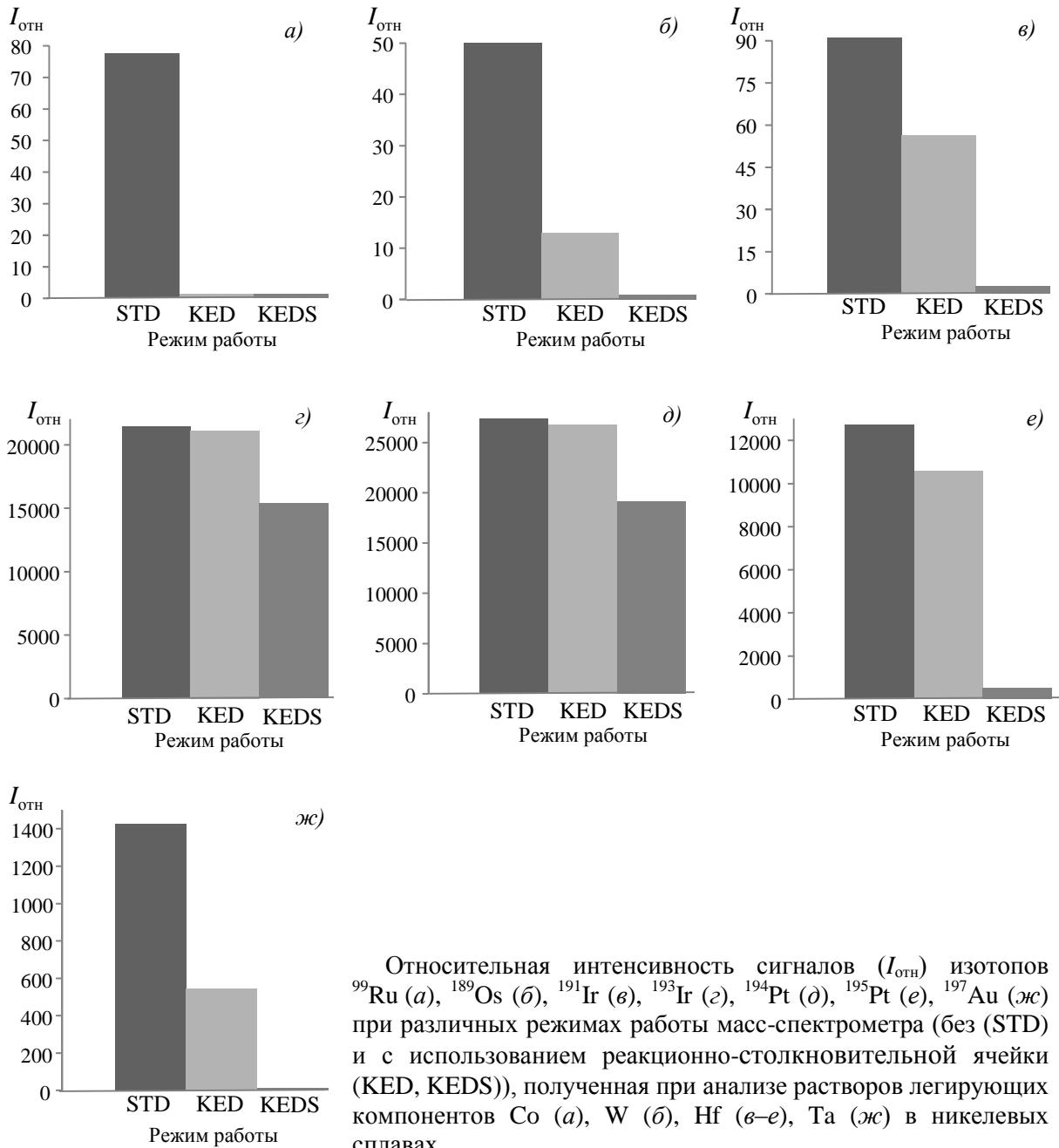
Для оценки мешающего влияния легирующих элементов определяли относительную интенсивность:

$$I_{\text{отн}} = I_{\text{л}}/I_{\text{ф}},$$

где $I_{\text{л}}$ и $I_{\text{ф}}$ – интенсивности сигнала в растворе легирующего элемента и фонового сигнала (холостого раствора).

Анализ выполняли в режимах STD, KED и KEDS. Как видно из рисунка, мешающий эффект при определении изотопа ^{99}Ru оказывает Co ($I_{\text{отн}} < 80$). Для устранения данного наложения достаточно режима работы KED. Режим работы KEDS также позволяет устранить данный эффект, однако при этом уменьшается чувствительность анализа по сравнению с режимом KED. На определение изотопа ^{189}Os мешающее влияние оказывает W ($I_{\text{отн}} < 50$), наложение устраняется режимом работы KEDS. На определение изотопов ^{191}Ir и ^{193}Ir мешающее влияние оказывает Hf ($I_{\text{отн}} < 90$ и 20000 для ^{191}Ir и ^{193}Ir соответственно). При этом для изотопа ^{191}Ir данный эффект позволяет устранить режим работы KEDS. На определение изотопов платины ^{194}Pt и ^{195}Pt мешающее влияние оказывает Hf ($I_{\text{отн}} < 5000$ и 12000 для ^{194}Pt и ^{195}Pt соответственно), при этом для ^{195}Pt данный эффект позволяет устранить режим работы KEDS. Применение реакционно-столкновительной ячейки при определении изотопов ^{193}Ir и ^{194}Pt не дало положительных результатов. На определение изотопа ^{197}Au мешающее влияние оказывает Ta ($I_{\text{отн}} < 1400$), наложение устраняется режимом работы KEDS.

Таким образом, в ходе дальнейшей работы необходимо использовать изотоп ^{99}Ru в режиме работы KED и изотопы ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{195}Pt , ^{197}Au в режиме работы KEDS. На определение ^{105}Pd и ^{103}Rh легирующие элементы не оказывают мешающего влияния, их можно выявить в стандартном режиме STD.



Определение металлов платиновой группы и золота в никелевом сплаве

В образце жаропрочного никелевого сплава, легированного кобальтом, вольфрамом, танталом, молибденом, гафнием и цирконием, определены рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина и золото с использованием подобранных ранее настроек прибора (табл. 3). Для определения платины, помимо режима работы KEDS, также использовали математическую коррекцию. Для этого анализировали

раствор гафния и определяли разницу между интенсивностями сигналов, полученными на массе изотопа ^{195}Pt и при исследовании сплава.

Таблица 3

**Содержание металлов платиновой группы и золота
в никелевом сплаве ($n = 4, P = 0,95$)**

Метод анализа	Массовая доля элементов, мкг/г						
	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au
Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой	0,21±0,03	0,15±0,02	0,07±0,01	0,23±0,03	0,29±0,04	0,32±0,04	0,16±0,02
Масс-спектрометрия высокого разрешения с тлеющим разрядом	0,23±0,02	0,16±0,01	0,06±0,01	0,22±0,02	0,26±0,03	0,34±0,03	0,17±0,01

Для всех элементов подтверждается точность результатов (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения). Результаты анализа, полученные без использования внутренних стандартов, не приведены, так как при этом происходит их сильное завышение по сравнению с аттестованными значениями.

Таким образом, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой позволяет точно определить металлы платиновой группы и золото в никелевых сплавах, легированных Co, W, Ta, Mo, Hf, Zr.

Заключения

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволяет контролировать содержание металлов платиновой группы и золота в никелевом сплаве;
- для определения палладия (изотоп ^{105}Pd) и родия (изотоп ^{103}Rh) можно использовать стандартный режим работы масс-спектрометра (STD); рутения (изотоп ^{99}Ru) – режим KED; осмия (изотоп ^{189}Os), иридия (изотоп ^{191}Ir), платины (изотоп ^{195}Pt) и золота (изотоп ^{197}Au) – режим KEDS;
- для определения платины необходимо проводить математическую коррекцию по мешающему элементу Hf;
- достоверность результатов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой подтверждена путем сравнительного анализа с данными, полученными методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом.

Список источников

1. 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: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.

4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2007. № 2. С. 6–16.
5. 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: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
6. 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 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // *Компетентность*. 2017. № 2. С. 40–46.
8. ГОСТ 12228.1–78. Рутений. Метод спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 1977. С. 1–3.
9. Van Meel K., Smekens A., Behets M., Kazandjian P., Van Grieken R. Determination of platinum, palladium, and rhodium in automotive catalysts using high-energy secondary target X-ray fluorescence spectrometry // *Analytical Chemistry*. 2007. Vol. 79. No. 16. P. 6383–6389.
10. Tsogas G.Z., Giokas D.L., Vliessides A.G., Evmiridis N.P. On the re-assessment of the optimum conditions for the determination of platinum, palladium and rhodium in environmental samples by electrothermal atomic absorption spectrometry and microwave digestion // *Talanta*. 2008. Vol. 76. P. 635–641.
11. Тютюнник О.А., Набиуллина С.Н., Аносова М.О., Кубракова И.В. Определение следовых содержаний элементов платиновой группы и золота в ультраосновных породах с использованием сорбентов AG-X8 и LN-RESIN методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Журнал аналитической химии*. 2020. Т. 75. № 6. С. 527–536.
12. Лейкин А.Ю., Карандашев В.К., Лисовский С.В., Волков И.А. Использование реакционно-столкновительной ячейки для определения примесных элементов в редкоземельных металлах методом ИСП-МС // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 5. С. 6–9.
13. Гребнева-Балюк О.Н., Кубракова И.В. Определение элементов платиновой группы в геологических объектах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: возможности и ограничения // *Журнал аналитической химии*. 2020. Т. 75. № 3. С. 195–208.
14. Меньшиков В.И., Власова В.Н., Ложкин В.И., Сокольникова Ю.В. Определение элементов платиновой группы в горных породах методом ИСП-МС с внешней градуировкой после отделения матричных элементов на катионите КУ-2-8 // *Аналитика и контроль*. 2016. Т. 20. № 3. С. 190–201.
15. 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.

References

1. 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: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys for advanced aviation gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 6–16.
5. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew 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: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
6. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Kablov E.N., Chabina E.B., Morozov G.A., Muravskaya N.P. Conformity assessment of new materials using high-level RMs and MI. *Kompetentnost*, 2017, no. 2, pp. 40–46.
8. State Standard 12228.1–78. *Ruthenium. Spectral analysis method*. Moscow: Publ. House of Standards, 1977, pp. 1–3.
9. Van Meel K., Smekens A., Behets M., Kazandjian P., Van Grieken R. Determination of platinum, palladium, and rhodium in automotive catalysts using high-energy secondary target X-ray fluorescence spectrometry. *Analytical Chemistry*, 2007, vol. 79, no. 16, pp. 6383–6389.
10. Tsogas G.Z., Giokas D.L., Vliessidies A.G., Evmiridis N.P. On the re-assessment of the optimum conditions for the determination of platinum, palladium and rhodium in environmental samples by electrothermal atomic absorption spectrometry and microwave digestion. *Talanta*, 2008, vol. 76, pp. 635–641.
11. Tyutyunnik O.A., Nabiullina S.N., Anosova M.O., Kubrakova I.V. Determination of trace contents of platinum group elements and gold in ultramafic rocks using AG-X8 and LN-RESIN sorbents by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2020, vol. 75, no. 6, pp. 527–536.
12. Leikin A.Yu., Karandashev V.K., Lisovsky S.V., Volkov I.A. Use of a reaction-collision cell for the determination of impurity elements in rare earth metals by ICP-MS. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2014, vol. 80, no. 5, pp. 6–9.
13. Grebneva-Balyuk O.N., Kubrakova I.V. Determination of platinum group elements in geological objects by inductively coupled plasma mass spectrometry: possibilities and limitations. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2020, vol. 75, no. 3, pp. 195–208.
14. Menshikov V.I., Vlasova V.N., Lozhkin V.I., Sokolnikova Yu.V. Determination of platinum group elements in rocks by ICP-MS with external calibration after separation of matrix elements on the KU-2-8 cation exchanger. *Analytics and Control*. 2016, vol. 20, no. 3, pp. 190–201.
15. 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.

Информация об авторах

Безносюк Анастасия Николаевна, техник I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Anastasia N. Beznosyuk, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 04.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.07.2024.

The article was submitted 04.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.07.2024.