

УДК 543.51:669.245

А.В. Алексеев¹, П.В. Якимович¹, И.К. Кваченок²**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В НИКЕЛЕ МЕТОДОМ ИСП-МС**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-101-108

Проведено определение содержаний примесей 20 элементов (P, Ti, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi) в образцах никеля методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Приведена методика растворения пробы и подготовки ее к анализу. Спектральные интерференции устранены с помощью применения уравнений математической коррекции, реакционно-столкновительной ячейки, а также путем подбора мощности плазмы. Правильность полученных результатов подтверждена анализом сертифицированного стандартного образца никелевого сплава. Диапазон определяемых концентраций: 0,00002–0,0101% (по массе).

Ключевые слова: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), никелевые сплавы, определение вредных примесей, анализ никеля, микроволновая пробоподготовка.

A.V. Alekseev¹, P.V. Yakimovich¹, I.K. Kvachonok²**DETERMINATION OF IMPURITIES IN NICKEL BY ICP-MS**

The content of impurities of 20 elements (P, Ti, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi) in nickel samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The technique of sample dissolution and its preparation for analysis is given. Spectral interference was eliminated using the equations of mathematical correction, the use of a reaction-collision cell, and also by selecting the plasma power. The correctness of the results is confirmed by analysis of a certified standard sample of nickel alloy. The range of determined concentrations: 0,00002–0,0101% of the mass.

Keywords: inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), nickel alloys, determination of harmful impurities, nickel analysis, microwave sample preparation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» [Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University]; e-mail: info@rector.msu.ru

Введение

В настоящее время никель применяется в качестве основы большого количества различных сплавов и материалов, таких как жаропрочные никелевые сплавы, которые используются для изготовления ответственных узлов и деталей современных газотурбинных двигателей. Данные материалы должны обладать уникальными свойствами жаропрочности, повышенной термостойкостью, термической и механической выносливостью, поскольку эксплуатация изделий из этих сплавов проходит при больших температурах, которые достигают максимальных значений 1640–1940 К перед турбиной высокого давления (ТВД) [1–4]. К перспективному направлению можно также отнести разработку и создание жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля, имеющих

рабочие температуры порядка 1200–1350 °С для сплава марки ВКНА-1ЛК [5]. Для проектирования и производства современных летательных аппаратов необходимо создавать новые типы жаропрочных сплавов с все более улучшенными характеристиками.

Чрезвычайно важная составляющая при производстве качественных никелевых сплавов – контроль химического состава исходного сырья и шихтовых материалов. Особенно это касается самого никеля, являющегося основой данных сплавов. При анализе никеля необходимо определять большое количество примесей, которые даже в микроколичествах оказывают негативное влияние на различные свойства выпускаемых сплавов [6].

В настоящее время существует более 20 нормативных документов (ГОСТ), описывающих методики определения вредных примесей в никеле. В большей части методик применяется классический метод спектрофотометрии. Так, для определения мышьяка в диапазоне содержаний 0,0005–0,05% (по массе) пробу никеля растворяют в азотной кислоте, мышьяк отделяют от основных компонентов сплава соосаждением с гидроксидом железа. Далее осадок растворяют серной кислотой, добавляют избыток йодистого калия и проводят экстракцию образовавшегося йодида мышьяка четыреххлористым углеродом. Полученный экстракт соединений мышьяка вступает в реакцию с молибденово-кислым аммонием и серно-кислым гидразином с образованием комплексного соединения, обладающего желтой окраской, раствор которого и анализируют на спектрофотометре, рассчитывая содержание определяемого элемента в исходном образце [7]. Висмут определяют путем растворения пробы азотной кислотой, соосаждением с гидроксидом железа и последующим образованием окрашенного комплекса с ксиленоловым оранжевым, измеряя оптическую плотность которого, можно определить содержание искомого элемента в исходном материале [8]. Исходя из вышеприведенного, данные методики характеризуются чрезвычайно большой трудоемкостью и сложностью, а также позволяют определять только по одному элементу и не всегда с достаточными пределами обнаружения.

К более совершенным методам анализа можно отнести атомно-абсорбционную спектроскопию. Кадмий при использовании данного вида анализа возможно определять в широком диапазоне содержаний: 0,00001–0,0030% (по массе). Растворенную в азотной кислоте пробу упаривают, разбавляют водой до необходимого объема и подвергают электротермической атомизации в токе аргона. Измерение абсорбции (поглощения) растворов проводят при длине волны 228,8 нм с вычислением концентрации кадмия. Атомизацию также можно проводить в пламени ацетилена и на воздухе. Однако тогда наименьшие измеряемые концентрации кадмия возрастают до 0,0002% (по массе), что не подходит для анализа всех современных марок никеля [9]. Атомно-абсорбционная спектроскопия относится к одноэлементным методам анализа и подходит для определения не всех примесных элементов.

Одним из самых распространенных современных методов анализа является атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Метод основан на возбуждении спектра атомов определяемых элементов индуктивно связанной плазмой с последующей регистрацией излучения спектральных линий фотоэлектрическим способом и позволяет проводить одновременное измерение концентраций большого количества элементов в различных материалах. При проведении анализа используют зависимость интенсивностей спектральных линий элементов от их массовых долей в пробе. В методике [10] приведено описание определения 9 элементов (Al, Fe, Cd, Co, Si, Mg, Mn, Cu, Zn) в никеле с низкими минимальными значениями концентраций – для цинка наименьшая определяемая концентрация 0,0003% (по массе), однако перечень определяемых элементов неполный по сравнению с требованиями на химический состав никеля. Англоязычная методика ИСП-АЭС [11] расширяет перечень

определяемых элементов, но характеризуется более узкими диапазонами измеряемых концентраций по сравнению с отечественной методикой. Так, для фосфора минимальные значения содержаний по англоязычной методике 0,0040% (по массе), для отечественной 0,0010% (по массе), что также недостаточно для анализа никеля марки ДНК-0 (фосфор – не более 0,0005% (по массе)). К недостаткам метода ИСП-АЭС также можно отнести наличие огромного количества спектральных интерференций (наложений), что делает затруднительным анализ никеля и его сплавов.

Для определения примесей в материалах различного состава широко используется масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) [12]. Метод позволяет одновременно определять большое число элементов и отличается низкими пределами обнаружения, простотой пробоподготовки с использованием микроволнового разложения пробы в смеси кислот. В методике [13] приведено применение метода ИСП-МС для определения примесей в никелевых сплавах, но перечень определяемых элементов очень ограничен (всего 7 элементов – As, Bi, Ga, Pb, Ag, Sn, Tl), а диапазоны измерения концентраций не полностью удовлетворяют требованиям к анализу никеля. Так, наименьшая определяемая концентрация олова в методике 0,00022% (по массе), а для никеля марки ДНК-0 – не более 0,0001% (по массе).

Вместе с тем метод ИСП-МС имеет и ряд недостатков, основным из которых является наличие спектральных интерференций (наложений) сигналов (массовых пиков) от разных элементов друг на друга, что делает затруднительным анализ объектов сложного состава [14].

Для решения данной проблемы можно использовать несколько подходов:

- применение реакционно-столкновительной ячейки, являющейся составной частью современных масс-спектрометров, в режиме дискриминации по кинетической энергии (КЕД); через ячейку при этом пропускается инертный газ [15];

- проведение математической коррекции путем измерения сигнала изотопа мешающего элемента, который свободен от наложений, и вычитание данного сигнала из общего значения с учетом распространенности изотопов для конкретного элемента [16];

- уменьшение выходной мощности генератора плазмы для подавления образования двухзарядных ионов, сигналы которых накладываются на массовые пики искоемых элементов [17].

Таким образом, цель данной работы – исследование возможности определения примесей в никеле методом ИСП-МС путем преодоления спектральных интерференций различными способами и выбора оптимальных условий измерений.

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

Материалы и методы

Аппаратура

В работе использовали масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP Q (Thermo Fisher Scientific, Германия). Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов выполняли автоматическую настройку параметров работы прибора в соответствии со стандартной процедурой подготовки прибора, заданной производителем (табл. 1). При этом для настроечного раствора, содержащего Li, In, Ba, Ce, U с концентрацией 1 мкг/дм³, чувствительность составляла, имп·с⁻¹/(мкг/дм³) (не менее): 60000 ⁷Li, 250000 ¹¹⁵In, 400000 ²³⁸U; уровень оксидных ионов – ¹⁵⁶CeO/¹⁴⁰Ce=2,0%; уровень двухзарядных ионов – ¹³⁷Ba²⁺/¹³⁷Ba=2,5%.

Параметры настройки прибора

Параметр прибора	Значение параметра
Плазмообразующий газ, л/мин	14,0
Вспомогательный газ, л/мин	0,8
Распылительный газ, л/мин	0,99
Скорость перистальтического насоса, об/мин	40
Глубина плазмоотбора, мм	5
Мощность RF-генератора, Вт	1400
Число каналов на массу	1
Число сканов в реплике	50
Число реплик для образца	3
Продолжительность интегрирования (Dwell time), с	0,01
Напряжение на экстракторе (Extraction Lens 2), В	164
Напряжение на фокусной линзе (CCT Focus Lens), В	3,6
Разрешение, а.е.м.	0,7
Распылитель	Микропоточный, концентрический PFA-ST (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

Работа реакционно-столкновительной ячейки с гелием в режиме KED позволяет избежать возникновения новых интерференций, которые имеют место при использовании реакционно-способных газов, что дает возможность анализировать образцы со сложной матрицей и переменным составом [14]. Проведена настройка работы реакционно-столкновительной ячейки в режиме KED с гелием, при этом значение напряжения на входе в квадруполь Pole Bias составило -17 В, напряжение на выходе из ячейки CCT Bias: -20 В. Расход гелия через ячейку подобран вручную и составил 6,5 мл/мин, при этом достигнут минимальный уровень оксидных ионов – $^{156}\text{CeO}/^{140}\text{Ce}=0,5\%$.

Для растворения проб использовали систему микроволновой пробоподготовки MARS 6 (SEM, США) с тефлоновыми автоклавами MARS Xpress Plus (SEM, США) объемом 100 см³.

Реагенты и объекты исследования

Для растворения проб использовали азотную и соляную кислоты марки «осч», очищенные с помощью системы перегонки без кипения в аппарате BSB-939-IR (Berghof, Германия). В качестве растворителя применяли деионизованную воду (сопротивление – не менее 18,2 МОм). В качестве внутреннего стандарта, который вводили вручную, использовали растворы индия и европия с концентрацией 2 мкг/л, приготовленные из стандартных растворов In и Eu с концентрацией 1 г/л производства High-Purity Standards (США). При построении градуировочных зависимостей для аналитического определения применяли стандартные растворы Р, Ti, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi с концентрацией 1 г/л производства High-Purity Standards (США).

Исследован сертифицированный стандартный образец (СО) состава никеля IARM-190A (Analytical Reference Materials Inc., США).

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 никеля массой по 0,5 г (четыре параллельные пробы) растворяли в смеси: вода (20 мл)+HNO₃ (8 мл)+HF (2 мл). Вода необходима для лучшего растворения получаемых в процессе разложения солей, а также для равномерного распределения микроволновой мощности. Вначале к образцу добавляли воду, далее плавиковую кислоту и затем азотную кислоту. Нагрев автоклавов в микроволновой системе до 120 °С осуществляли в течение 20 мин, затем еще 20 мин поддерживали эту температуру. Максимальную мощность нагрева задавали из расчета 150 Вт на автоклав, предельное давление – не более 20 ат (2 МПа). Полученный раствор доводили до объема 100 мл и разбавляли до концентрации 0,5 г/л по матрице, далее использовали непосредственно для измерения.

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации использовали метод добавок, при котором известные содержания определяемых элементов вводят как добавки непосредственно в анализируемый образец. Внутренние стандарты применяли для коррекции временного дрейфа сигнала в течение измерений и матричного влияния компонентов основы сплава на интенсивности сигналов определяемых элементов. Получены результаты как с использованием двух внутренних стандартов (In, Eu), так и без них.

Сбор и обработку данных проводили с помощью программного обеспечения масс-спектрометра Qtegra. За результат измерений принимали среднее арифметическое результатов четырех параллельных проб (включая все стадии пробоподготовки).

Результаты и обсуждение

Перед началом анализа необходимо выбрать изотопы определяемых элементов с учетом их максимальной распространенности для достижения максимального аналитического сигнала и с минимальным числом возможных интерференций (табл. 2) [14].

Таблица 2

Изотопы определяемых элементов, основные интерференции и способы подавления интерференций

Определяемый элемент	Изотоп	Распространенность изотопа, %	Мешающие ионы	Распространенность иона-интерферента, %	Способ подавления интерференции
P	³¹ P	100	¹⁴ N ¹⁶ OH ⁺	99,63	Математическая коррекция: $^{31}\text{P} = ^{31}\text{P} \cdot k \cdot ^{15}\text{N}$, где ³¹ P и ¹⁵ N – интенсивности при <i>m/z</i> : 31 и 15 соответственно; <i>k</i> =0,04 [16] Уменьшение выходной мощности генератора плазмы [17]
			⁶² Ni ⁺⁺	3,59	
Ti	⁴⁸ Ti	73,8	–	–	–
V	⁵¹ V	99,8	–	–	–
Mn	⁵⁵ Mn	100	–	–	–
Fe	⁵⁶ Fe	91,2	⁴⁰ Ar ¹⁶ O ⁺	99,6	Измерение в режиме KED [15]
Fe	⁵⁷ Fe	2,1	⁴⁰ Ar ¹⁶ OH ⁺	99,6	Измерение в режиме KED [15]
Co	⁵⁹ Co	100	–	–	–
Cu	⁶³ Cu	69,2	–	–	–
Zn	⁶⁶ Zn	27,9	–	–	–
Ga	⁷¹ Ga	39,9	–	–	–
As	⁷⁵ As	100	–	–	–
Se	⁸² Se	81,9	–	–	–
Mo	⁹⁵ Mo	15,9	–	–	–
Ag	¹⁰⁷ Ag	51,8	–	–	–
Cd	¹¹¹ Cd	12,8	–	–	–
Sn	¹¹⁸ Sn	24,2	–	–	–
Sb	¹²¹ Sb	57,3	–	–	–
Te	¹³⁰ Te	33,9	–	–	–
Tl	²⁰⁵ Tl	70,5	–	–	–
Pb	²⁰⁸ Pb	52,4	–	–	–
Bi	²⁰⁹ Bi	100	–	–	–

Как видно из представленных в табл. 2 данных, основными проблемными элементами для определения являются железо и фосфор, причем основные мешающие интерференты – аргон и азот – присутствуют в плазмообразующем газе и кислоте соответственно, что приводит к значительным наложениям сигналов, устранить которые возможно с использованием реакционно-столкновительной ячейки и математической коррекции.

Определение примесей в стандартном образце никеля

Для проверки правильности проведено определение P, Ti, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb и Bi в стандартном образце никеля IARM-190A с подобранными ранее настройками прибора (табл. 3–5). Для определения железа использовали два изотопа железа (^{56}Fe и ^{57}Fe) в режиме измерения KED и в стандартном режиме. Значения содержаний фосфора рассчитывали с использованием математической коррекции (МК) и при нескольких значениях выходной мощности генератора плазмы: 1100, 1200, 1300, 1400 и 1500 Вт.

Таблица 3

Результаты определения содержания примесей в стандартном образце никеля IARM-190A ($n=4, P=0,95$)

Элемент	Массовая доля элементов, мг/кг, для значения	
	полученного	аттестованного
Mn	1,6±0,3	1,8±0,6
Cu	16,0±2,0	17,0±2,0
Zn	8,3±0,4	8,1±0,8
As	29,0±2,0	28,0±2,0
Se	6,9±0,8	6,5±1,2
Ag	11,1±0,3	10,9±0,9
Sn	5,9±0,4	6,2±0,8
Sb	11,0±1,0	11,0±1,0
Te	9,1±0,3	8,9±0,7
Tl	6,1±0,5	5,8±1,0
Pb	9,4±0,2	9,3±0,7
Bi	10,9±0,3	11,1±0,5
V	0,3±0,1	<0,5
Co	7,0±2,0	8,0±2,0
Ga	0,2±0,1	<0,5
Mo	0,7±0,2	<1,0
Ti	6,0±2,0	6,0±1,0
Cd	5,0±1,0	5,0±1,0

Как видно из данных, представленных в табл. 3, для всех элементов подтверждается точность полученных результатов (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения). Результаты без использования внутренних стандартов не приведены, так как при этом происходит сильное завышение полученных значений по сравнению с аттестованными.

Наиболее точные результаты определения фосфора (аттестованное значение попадает в доверительный интервал полученного значения) получены с использованием математической коррекции и при выходной мощности генератора плазмы, равной 1300 Вт, что можно объяснить уменьшением образования иона $^{62}\text{Ni}^{++}$ по сравнению с большей мощностью. Использование мощности <1300 Вт нецелесообразно, так как при этом уменьшаются интенсивности сигналов от ионов элементов (табл. 4).

Таблица 4

Результаты определения содержания фосфора (аттестованное значение 34 ± 5 мг/кг) в стандартном образце никеля IARM-190A ($n=4, P=0,95$) при различных условиях анализа

Выходная мощность генератора плазмы, Вт	Полученные значения массовой доли фосфора, мг/кг, при определении с математической коррекцией
1100	34 ± 3
1200	33 ± 2
1300	32 ± 3 (39 ± 2)*
1400	41 ± 4
1500	58 ± 6

* В скобках – значение без математической коррекции.

Из данных, представленных в табл. 5, следует, что определение железа в никеле необходимо проводить в режиме измерения KED и с использованием изотопа ^{57}Fe .

Таблица 5

Результаты определения содержания железа (аттестованное значение 99 ± 3 мг/кг) в стандартном образце никеля IARM-190A ($n=4, P=0,95$) при различных условиях анализа

Изотоп железа	Полученные значения массовой доли железа, мг/кг, при определении	
	без режима KED*	с режимом KED
^{56}Fe	158 ± 7	135 ± 4
^{57}Fe	128 ± 6	101 ± 4

* Режим дискриминации по кинетической энергии.

Таким образом, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой позволяет точно определять примеси в никеле с использованием подобранных в данной работе условий анализа.

Пределы обнаружения примесей в никеле

В экспериментах со стандартным образцом никеля IARM-190A рассчитаны пределы обнаружения, представленные в табл. 6.

Таблица 6

Пределы обнаружения примесей в стандартном образце никеля IARM-190A

Элемент	P	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sn
Предел обнаружения, мг/кг	0,4	0,06	4,5	0,07	0,2	0,25	0,4	0,01	0,015	0,04
Элемент	Sb	Te	Tl	Pb	Bi	V	Co	Ga	Mo	Ti
Предел обнаружения, мг/кг	0,03	0,04	0,004	0,03	0,007	0,03	0,04	0,007	0,03	0,08

Заключения

В результате исследования возможности определения содержаний примесей в никеле методом ИСП-МС путем преодоления спектральных интерференций различными способами и выбора оптимальных условий измерений можно сделать следующие выводы:

- метод ИСП-МС позволяет проводить контроль содержаний всех необходимых примесей в никеле, что обеспечивает качество выпускаемой продукции, в которой применяется данный металл;
- разработаны подходы к определению примесей в никеле методом ИСП-МС;
- правильность результатов анализа подтверждена анализом сертифицированного стандартного образца никеля;

- при определении фосфора в никеле необходимо использовать математическую коррекцию и выходную мощность генератора плазмы, равную 1300 Вт;
- определение железа необходимо проводить в режиме измерения KED и с использованием изотопа ^{57}Fe .

Библиографический список

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. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
5. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
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 6689.13–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения мышьяка. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 1–4.
8. ГОСТ 6689.17–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения висмута. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 1–4.
9. ГОСТ 13047.16–2002. Никель. Кобальт. Методы определения кадмия. М.: Изд-во стандартов, 2002. С. 1–3.
10. ГОСТ 6012–98. Никель. Методы химико-атомно-эмиссионного спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 1999. С. 1–4.
11. ASTM E2594–09. Standard Test Method for Analysis of Nickel Alloys by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (Performance-Based Method). USA, 2014. P. 1–9.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS // *Mikrochimica Acta*. 2001. Vol. 137. P. 149–155.
13. ASTM E2823–17. Standard Test Method for Analysis of Nickel Alloys by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Performance-Based). USA, 2017. P. 1–8.
14. 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.
15. 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.
16. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2014. №10. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2019). DOI: 10.18557/2307-6046-2014-0-10-2-2.
17. Карандашев В.К., Жерноклеева К.В., Карпов Ю.А. Использование двухзарядных ионов при определении некоторых редкоземельных элементов в неодиме, самарии, европии и их соединениях методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. №12. С. 5–10.