



УДК 543.51; 669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-9-9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЫШЬЯКА И СЕЛЕНА
В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ
ИСП-МС С ГИДРИДНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ПАРОВ**

А.В. Алексеев

кандидат биологических наук

П.В. Якимович

Ноябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 543.51; 669.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-9-9

А.В. Алексеев¹, П.В. Якимович¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЫШЬЯКА И СЕЛЕНА В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ ИСП-МС С ГИДРИДНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ПАРОВ

В настоящее время в современной авиационной промышленности и двигателестроении широко применяются жаропрочные никелевые сплавы, испытывающие огромные тепловые и силовые нагрузки. Наличие в никелевых сплавах мышьяка и селена приводит к катастрофическому ухудшению их физических и механических свойств.

В работе проведено определение содержания мышьяка и селена в стандартных образцах (СО) никелевых сплавов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в сочетании с гидридной генерацией паров. Приведена методика растворения пробы и подготовки ее к анализу. Спектральные интерференции устранены путем отделения определяемых элементов с помощью гидридообразования. Предел обнаружения составил, % (по массе): 0,00001 Se и 0,000005 As, диапазон определяемых концентраций: 0,00006–0,0012% (по массе), относительное стандартное отклонение не превышает 0,05.

Ключевые слова: *масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), никелевые сплавы, определение содержания мышьяка и селена, микроволновая пробоподготовка.*

A.V. Alekseev, P.V. Yakimovich

DETERMINATION OF ARSENIC AND SELENIUM IN HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOYS BY ICP-MS METHOD WITH HYDRIDE GENERATION OF VAPOR

Now in the modern aviation industry and engine-manufacturing high - temperature nickel alloys, subjecting to huge thermal and power loadings are widely used. Arsenic and selenium presence in nickel alloys leads to catastrophic deterioration of their physical and mechanical properties.

In this paper a determination of arsenic and selenium in standard samples of nickel alloys was carried out by mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS), combined with a hydride vapor generation. A technique of dissolution of the probe and its preparation for analysis is given. Spectral interferences were eliminated by separation of the elements determined, using hydrides formation. The detection limit was 0,00001% Se by mass, 0,000005% As by mass, range of determined concentrations: of 0,00006–0,0012% by mass, relative standard deviation of less than 0,05.

Keywords: *mass-spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS), nickel alloys, determination of arsenic and selenium content, 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

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы широко применяются в современной авиационной промышленности и двигателестроении [1]. Из них изготавливают важнейшие детали, которые испытывают огромные тепловые и силовые нагрузки [2–10]. Поэтому к данным сплавам предъявляются повышенные требования по химическому составу, в особенности к содержанию микропримесей, таких как мышьяк и селен. Присутствие данных элементов приводит к ухудшению физических и механических свойств никелевых сплавов [11, 12].

Классическим методом определения содержания мышьяка и селена в никелевых сплавах является спектрофотометрия. Наличие в структуре сплава мышьяка определяют по образованию желтого мышьяково-молибденового комплекса с последующим восстановлением его сернокислым гидразином до мышьяково-молибденовой сини [13], а селен – с помощью измерения светопоглощения (при длине волны 330 нм) раствора комплексного соединения селена с *o*-фенилендиамином после предварительного экстракционного извлечения его толуолом [14]. Данные методики весьма трудоемки и не позволяют проводить одновременное определение содержания Se и As в сплаве.

В настоящее время одним из самых лучших методов многоэлементного анализа является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Метод отличается высокой чувствительностью, низкими пределами обнаружения и возможностью одновременного определения большого количества элементов. Прямое определение

содержания мышьяка и селена не всегда возможно ввиду наличия большого количества спектральных интерференций [15]. Большую их часть можно подавить с помощью использования реакционно-столкновительной ячейки [16], но полностью устранить с помощью данного метода нельзя.

Данную проблему можно решить с помощью химической генерации паров гидридов мышьяка и селена [17] с последующим детектированием атомно-абсорбционной спектрометрией [18], атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно связанной плазмой [19] и ИСП-МС [20, 21].

Необходимо упомянуть о методах ИСП-МС высокого разрешения [22] и масс-спектрометрии с тлеющим разрядом высокого разрешения [23], которые также подходят для определения содержания мышьяка и селена в никелевых сплавах, но имеют некоторые недостатки, такие как высокая стоимость оборудования и наличие спектральных интерференций.

Таким образом, цель данной работы заключалась в повышении точности определения содержания мышьяка и селена в никелевых сплавах методом ИСП-МС с гидридной генерацией паров путем преодоления спектральных наложений и выбора оптимальных условий измерений.

Материалы и методы

Аппаратура

Определение содержания мышьяка и селена методом ИСП-МС выполняли на масс-спектрометре iCAP Qc (фирмы Thermo Fisher Scientific, Германия). Параметры работы прибора, при которых проводились эксперименты, представлены в табл. 1. Инструментальные параметры и расходы потоков аргона устанавливали в пределах, обеспечивающих максимальную чувствительность определения ионов изотопов $^{75}\text{As} \geq 1500000$, $^{78}\text{Se} \geq 300000$ и $^{82}\text{Se} \geq 150000$ (имп/с)/(мкг/л) в настроечном растворе, содержащем 1 и 10 мкг/л As и Se соответственно.

Параметры настройки прибора и измерений*

Параметр прибора	Значение параметра
Плазмообразующий газ, л/мин	14
Вспомогательный газ, л/мин	0,8
Распылительный газ, л/мин	0,7
Дополнительный газ, %	50
Скорость перистальтического насоса, об./мин	40
Глубина плазмоотбора, мм	3
Мощность RF генератора, Вт	1150
Число каналов на массу	1
Продолжительность сканирования, с	30
Продолжительность интегрирования (Dwell time), с	0,05
Напряжение на экстракторе (Extraction Lens 2), В	170
Напряжение на фокусной линзе (CCT Focus Lens), В	1,5
Разрешение, а.е.м.	0,7

* В процессе всех измерений использовали полуразборную горелку с корундовым инжектором $\varnothing 2$ мм.

Генерацию паров гидридов осуществляли в приставке гидридной генерации iCAP Enhanced Vapour System (Thermo Fisher Scientific, Германия). Схема собранной приставки показана на рисунке.

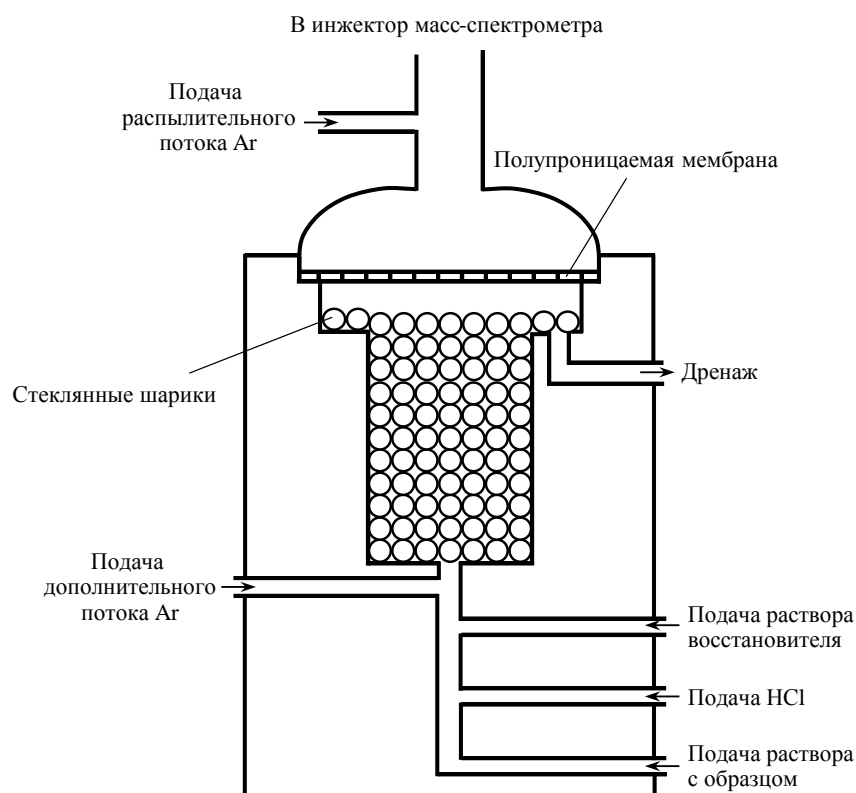


Схема приставки для генерации гидридов

Сопряжение гидридной приставки с горелкой масс-спектрометра выполнялось через тефлоновый адаптер, изготовленный в ВИАМ. Пары гидридов, выходя из газожидкост-

ного сепаратора, смешивались с распылительным потоком аргона в Т-образном тройнике, из которого направлялись в инжектор горелки масс-спектрометра.

Подачу реагентов в гидридную приставку осуществляли с помощью четырехканального перистальтического насоса MINIPULS 3 (Gilson, Франция).

Для растворения пробы при нагревании применяли микроволновую систему MARS 6 (CEM, США) в тefлоновых автоклавах MARS Xpress Plus (CEM, США) объемом 100 см³ с аварийным сбросом давления.

Реагенты и объекты исследования

Очистку HNO₃ и HCl проводили с помощью суббойлерной дистилляции в аппарате BSB-939-IR (Berghof, Германия), исходные растворы кислот были марки «осч». Также использовали 40% (по массе): фтористоводородную кислоту (Merck, Германия); тиомочевину, изготовленную по ГОСТ 6344–73; лимонную кислоту марки «хч»; гидроксид натрия марки «осч» и боргидрид натрия марки «хч». Деионизованная вода (проводимость не менее 18,2 МОм/см) использовалась во всех экспериментах как растворитель. Стандартные растворы мышьяка и селена с концентрацией 1 мг/л были приготовлены из стандартных растворов 1000 мг/л (High-Purity Standards, США) путем последовательного десятикратного разбавления водой. Рабочий раствор соляной кислоты готовили путем разбавления 10 мл концентрированной соляной кислоты водой до 100 мл. Рабочие растворы восстановителя приготовлены путем растворения навесок боргидрида натрия (0,5 г), гидроксида натрия (0,25 г) и тиомочевины (1 г) в 100 мл воды (в другом случае вместо тиомочевины использовали лимонную кислоту (1 г)). Данные концентрации реагентов были подобраны исходя из максимального сигнала, который получен от водного раствора мышьяка (1 мкг/л) и селена (10 мкг/л).

В работе использовали следующие сертифицированные стандартные образцы (СО) состава сплавов: BS 625A (Inconel 625), Brammer standard company, США; SRM 899 (Trace alloy «С»), NIST, США. В работе также использовали изготовленный в ВИАМ сплав ВЖМ5 (трех плавок 1–3). Все приведенные выше сплавы – на никелевой основе.

Пробоподготовка образцов

Образцы SRM 899, ВЖМ5 (плавок 1–3) массой по 0,2 г (каждый) растворяли в смеси: вода (10 мл)+HCl (3 мл)+HF (1 мл)+HNO₃ (1 мл) при нагревании в микроволновой системе при 120°C в течении 20 мин. Такая схема растворения пригодна для сплавов Ni–Cr с низким содержанием тугоплавких элементов (Mo, W, Ta, Nb) [23, 24]. Образцы BS 625A массой 0,2 г растворяли в смеси: вода (5 мл)+HF (5 мл)+HNO₃ (5 мл) при

нагревании в микроволновой системе при 200°C в течение 10 мин и затем при 180°C в течение 30 мин. Выбор данных способов растворения обусловлен высоким содержанием хрома (до 22% (по массе)) и тугоплавких элементов в исследуемых образцах [24, 25]. Далее исследуемые образцы разбавляли до конечной концентрации растворенного вещества 1 г/л.

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации искомых элементов использовали метод стандартных добавок. Стандартные растворы мышьяка и селена вводили в автоклавы перед нагреванием для того, чтобы в конце пробоподготовки As и Se, содержащиеся в образце и в стандартных добавках, имели одинаковую степень окисления.

Сбор и обработку данных проводили используя программное обеспечение спектрометра Qtegra.

Результаты и обсуждение

Подбор комплексообразователя

Наличие переходных металлов высоких концентраций, таких как Ni, Co, Cr, в образцах никелевых сплавов значительно (более чем 90%) подавляет образование и высвобождение гидридов селена и мышьяка в процессе гидридной генерации. Применение различных маскирующих агентов (комплексообразователей) позволяет частично устранить отрицательное влияние переходных металлов на гидридообразование селена и мышьяка, а в ряде случаев – повысить эффективность данного процесса [19, 20].

В работе осуществлен подбор комплексообразователей, в качестве которых использовали тиомочевину и лимонную кислоту. Результаты определения содержания мышьяка и селена в стандартных образцах сплава ВЖМ5 (плавки 2 и 3) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения содержания As и Se в стандартных образцах никелевого сплава ВЖМ5 с применением различных комплексообразователей

Стандартный образец плавки*	Содержание элементов, % (по массе), при использовании в качестве комплексообразователя			
	тиомочевины		лимонной кислоты	
	As	Se	As	Se
1 (0,00008±0,00002) As; (0,00005±0,00001) Se	0,00006±0,0000 1	0,00006±0,0000 1	0,0012±0,0002	0,00003±0,0000 1
2 (0,0006±0,0001) As; (0,0005±0,0001) Se	0,0006±0,0001	0,0004±0,0001	0,0012±0,0003	0,00010±0,0000 2

* В скобках указано аттестованное значение содержания мышьяка и селена в % (по массе).

По данным табл. 2 видно, что наиболее точным является определение содержания элементов с использованием в качестве комплексообразователя тиомочевины, при этом достигается наибольшее соответствие найденного и аттестованного значения. Занижение значений содержания селена при использовании лимонной кислоты видимо связано с тем, что данный комплексообразователь не полностью подавляет эффект матрицы. Таким образом, в дальнейших экспериментах в качестве комплексообразователя использовалась тиомочевина.

Преодоление масс-спектральных интерференций

Гидридная генерация позволяет полностью отделить Se и As от элементов (Ni, Co, Cr, Nd, Gd, Dy, Er), создающих масс-спектральные помехи (оксидные и двухзарядные ионы) при традиционном пневматическом распылении в ИСП-МС [15]. Изотопы и их наиболее распространенные интерференции приведены в табл. 3.

Таблица 3

Изотопы и основные интерференции для масс-спектрометрического определения содержания As и Se

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Ионы, создающие помехи
⁷⁵ As	100	⁵⁹ Co ¹⁶ O ⁺ , ¹⁵⁰ Nd ²⁺
⁷⁸ Se	23,77	⁶² Ni ¹⁶ O ⁺ , ¹⁵⁶ Gd ²⁺
⁸² Se	8,73	⁵⁰ Cr ¹⁶ O ₂ ⁺ , ¹⁶⁴ Dy ²⁺ , ¹⁶⁴ Er ²⁺

**Результаты определения содержания As и Se в стандартных образцах
никелевого сплава ВЖМ5 (производства ВИАМ)**

Стандартный образец плавки*	Содержание элементов, % (по массе), определенное методом ИСП-МС			
	с гидридной генерацией		без генерации гидридов	
	As	Se	As	Se
1 (0,0006±0,0001) As; (0,00009±0,00002) Se	0,00006±0,00001	0,00008±0,00001	0,00014±0,00002	0,00017±0,00003
2 (0,00008±0,00002) As; (0,00005±0,00001) Se	0,00006±0,00001	0,00006±0,00001	0,00013±0,00002	0,00010±0,00001
3 (0,0006±0,0001) As; (0,0005±0,0001) Se	0,0006±0,0001	0,0004±0,0001	0,0011±0,0002	0,0007±0,0001

* В скобках указано аттестованное значение содержания мышьяка и селена в % (по массе).

Сравнение результатов определения содержания Se и As методом ИСП-МС в сочетании с гидридной генерацией с ИСП-МС без генерации гидридов (табл. 4) показывает, что традиционный метод ИСП-МС с пневматическим распылением дает неудовлетворительные показания.

Определение содержания Se и As в сертифицированных стандартных образцах

В работе выполнено определение содержания мышьяка и селена в двух сертифицированных стандартных образцах – SRM 899 и BS 625A методом ИСП-МС с гидридной генерацией и без генерации гидридов (табл. 5).

**Результаты определения содержания As и Se в сертифицированных
стандартных образцах**

Стандартный образец*	Содержание элементов, % (по массе), определенное методом ИСП-МС			
	с гидридной генерацией		без генерации гидридов	
	As	Se	As	Se
SRM 899 (0,00095±0,00001) Se	–	0,00098±0,00004	–	0,0014±0,0002
BS 625A (0,0012±0,0001) As	0,0012±0,0002	–	0,0017±0,0002	–

* В скобках указано аттестованное значение содержания мышьяка и селена в % (по массе).

По данным табл. 5 видно, что наиболее точным является определение содержания элементов с генерацией гидридов, при этом достигается наибольшее соответствие найденного и аттестованного значения.

Пределы обнаружения селена и мышьяка в растворах (LOD)

В экспериментах с концентрацией растворенного вещества 1 г/л LOD (по критерию 3σ) составил 0,1 мкг/л Se и 0,05 мкг/л As, что соответствует 0,00001% (по массе) Se и

0,000005% (по массе) As в никелевых сплавах. Относительное стандартное отклонение при этом составило: 0,04 – для As; 0,05 – для Se.

Заключение

Показана возможность точного определения содержания мышьяка и селена (в диапазоне от 0,00006 до 0,0012% (по массе)) в никелевых сплавах методом ИСП-МС с использованием гидридной генерации паров.

Спектральные интерференции, создающие помехи при определении содержания мышьяка и селена, полностью устраняются при использовании гидридной генерации паров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Мазалов И.С., Филонова Е.В., Ломберг Б.С. Формирование структуры при деформации и термической обработке заготовок деталей из никелевого высокопрочного свариваемого сплава ВЖ172 //Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 01 (viam-works.ru).
3. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (Часть I) //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.
4. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 52–57.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
6. Мин П.Г., Сидоров В.В. Опыт переработки литейных отходов сплава ЖС32-ВИ на научно-производственном комплексе ВИАМ по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 20–25.
7. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Производство дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.

8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
11. Liu H., Chen S. et al. Determination of bismuth, selenium and tellurium in nickel-based alloys and pure copper by flow-injection hydride generation atomic absorption spectrometry with ascorbic acid pre-reduction and cupferron chelation extraction //Analytica Chimica Acta. 2002. V. 459. P. 161–168.
12. Chen Z. and Jiang S. Determination of Ge, As and Se in nickel-based alloys by flow injection hydride generation dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry//J. Anal. At. Spectrom. 2006.V. 21. P. 566–573.
13. ГОСТ 6689.13–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения мышьяка.
14. ГОСТ 13047.25–2002. Никель. Кобальт. Методы определения селена в никеле.
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.
16. D’Ilio S., Violante N. et al. Dynamic reaction cell ICP-MS for determination of total As, Cr, Se and V in complex matrices: Still a challenge? (a review)//Analytica Chimica Acta. 2011.V. 698. P. 6–13.
17. Gao Y., Liu R. et al. Application of chemical vapor generation in ICP-MS: A review //China Sci. Bull. 2013. V. 58. №8. P. 1980–1991.
18. Guo X., Xu S. et al. Determination of As, Pb, Sn, Sb and Bi in high temperature iron and nickel-based alloy by graphite furnace atomic absorption spectrometry combined with liquid-liquid extraction //Spectroscopy and spectral analysis. 2006. V. 6. P. 1167–1169.

19. Campbell A.D. A critical survey of hydride generation techniques in atomic spectroscopy //Pure &Appl. Chem. 1992. V. 64. №2. P. 227–244.
20. Danadurai K., Hsu Y. Determination of selenium in nickel-based alloys by flow injection hydride generation reaction cell inductively coupled plasma mass-spectrometry //J. Anal. At. Spectrom. 2002. V.17. P. 552–555.
21. Chen Z. and Jiang S. Determination of Ge, As and Se in nickel-based alloys by flow injection hydride generation dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry //J. Anal. At. Spectrom. 2006. V. 21. P. 566–573.
22. Nie X., Liang Y. Determination of trace elements in high purity nickel by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry //J. Cent. South Univ. 2012. V. 19. P. 2416–2420.
23. Ганеев А.А., Губаль А.Р., Усков К.Н., Потапов С.В. Аналитическая масс-спектрометрия с тлеющим разрядом //Известия Академии наук. Сер. Химическая. 2012. №4. С. 1–17.
24. Якубенко Е.В., Войткова З.А., Черникова И.И., Ермолаева Т.Н. Микроволновая пробоподготовка для определения Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, W методом АЭС-ИСП в конструкционных сталях //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №1. С. 12–15.
25. Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н., Механик Е.А. Определение легирующих элементов никелевых сплавов авиационного назначения методом АЭС-ИСП в сочетании с микроволновой пробоподготовкой //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. №9. С. 6–9.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Mazalov I.S., Filonova E.V., Lomberg B.S. Formirovanie struktury pri deformacii i termicheskoj obrabotke zagotovok detalej iz nikelovogo vysokoprochnogo svariyaemogo splava VZh172 [The formation of structure in the deformation and heat-treated blanks of high-nickel alloy welded VZH172] //Trudy VIAM. 2013. №12. St. 01 (viam-works.ru).

3. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure] (Chast' I) //Materialovedenie. 1997. №4. S. 32–39.
4. Lomborg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engines parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. C. 52–57.
5. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
6. Min P.G., Sidorov V.V. Opyt pererabotki litejnyh othodov splava ZhS32-VI na nauchno-proizvodstvennom komplekse VIAM po izgotovleniju lityh prutkovyh (shihtovyh) zagotovok [Experience in processing of waste foundry alloy ZhS32-VI at the scientific-industrial complex for the production of cast VIAM of bar (charge) blanks] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 20–25.
7. Ponomarenko D.A., Moiseev N.V., Skugorev A.V. Proizvodstvo diskov GTD iz zharoprochnykh splavov na izotermicheskih pressah [Production GTE disks of superalloys isothermal presses] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 13–16.
8. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of gas turbine engine blades with a single-crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
9. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Kompleksnaja innovacionnaja tehnologija izotermicheskoj shtampovki na vozduhe v rezhime sverhplastichnosti diskov iz superzharoprochnykh splavov [Integrated innovative technology isothermal forging in air superplasticity disks from super heat-resistant alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 129–141.

11. Liu H., Chen S. et al. Determination of bismuth, selenium and tellurium in nickel-based alloys and pure copper by flow-injection hydride generation atomic absorption spectrometry with ascorbic acid pre-reduction and cupferron chelation extraction // *Analytica Chimica Acta*. 2002. V. 459. P. 161–168.
12. Chen Z. and Jiang S. Determination of Ge, As and Se in nickel-based alloys by flow injection hydride generation dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2006. V. 21. P. 566–573.
13. GOST 6689.13–92. *Nikel', splavy nikel'evye i medno-nikel'evye. Metody opredeleniya mysh'jaka* [Nickel, nickel and copper-nickel. Methods defined division of arsenic].
14. GOST 13047.25–2002. *Nikel'. Kobal't. Metody opredeleniya selena v nikel'e* [Nickel. Cobalt. Methods for determination of selenium in nickel].
15. Pupyshev A.A., Jepova E.N. *Spektral'nye pomehi poliatomnyh ionov v metode mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj* [Spectral interferences of polyatomic ions in the method of mass spectrometry with inductively coupled plasma] // *Analitika i kontrol'*. 2001. T.5. №4. S. 335–369.
16. D'Illo S., Violante N. et al. Dynamic reaction cell ICP-MS for determination of total As, Cr, Se and V in complex matrices: Still a challenge? (a review) // *Analytica Chimica Acta*. 2011. V. 698. P. 6–13.
17. Gao Y., Liu R. et al. Application of chemical vapor generation in ICP-MS: A review // *China Sci. Bull.* 2013. V. 58. №8. P. 1980–1991.
18. Guo X., Xu S. et al. Determination of As, Pb, Sn, Sb and Bi in high temperature iron and nickel-based alloy by graphite furnace atomic absorption spectrometry combined with liquid-liquid extraction // *Spectroscopy and spectral analysis*. 2006. V. 6. P. 1167–1169.
19. Campbell A.D. A critical survey of hydride generation techniques in atomic spectroscopy // *Pure & Appl. Chem.* 1992. V. 64. №2. P. 227–244.
20. Danadurai K., Hsu Y. Determination of selenium in nickel-based alloys by flow injection hydride generation reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2002. V.17. P. 552–555.
21. Chen Z. and Jiang S. Determination of Ge, As and Se in nickel-based alloys by flow injection hydride generation dynamic reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2006. V. 21. P. 566–573.

22. Nie X., Liang Y. Determination of trace elements in high purity nickel by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry //J. Cent. South Univ. 2012. V. 19. P. 2416–2420.
23. Ganeev A.A., Gubal' A.R., Uskov K.N., Potapov S.V. Analiticheskaja mass-spektrometrija s tlejushhim razrjadom [Analytical mass spectrometry with a glow discharge] //Izvestija Akademii nauk. Ser. Himicheskaja. 2012. №4. S. 1–17.
24. Jakubenko E.V., Vojtkova Z.A., Chernikova I.I., Ermolaeva T.N. Mikrovolnovaja probopodgotovka dlja opredelenija Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, W metodom AJeS-ISP v konstrukcionnyh staljah [Microwave sample preparation for the determination of Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, W by ICP-AES in structural steels] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2014. T. 80. №1. S. 12–15.
25. Dvoreckov R.M., Karachevcev F.N., Zagvozdina T.N., Mehanik E.A. Opredelenie legirujushhijh jelementov nikelovyh splavov aviacionnogo naznachenija metodom AJeS-ISP v sochetanii s mikrovolnovoj probopodgotovkoj [Determination of alloying elements nickel alloys for aircraft industry by AES-ICP in combination with microwave sample preparation] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2013. T. 79. №9. S. 6–9.