



УДК 543.5:546.76

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-12-12

**МИКРОВОЛНОВАЯ ПРОБОПОДГОТОВКА
ХРОМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ
МЕТОДОМ ИСП-МС**

А.В. Алексеев

кандидат биологических наук

П.В. Якимович

Ноябрь 2015

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.

МИКРОВОЛНОВАЯ ПРОБОПОДГОТОВКА ХРОМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ МЕТОДОМ ИСП-МС

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-12-12

Описана методика микроволновой пробоподготовки хрома для определения массовой доли Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), а также выполнено определение содержания данных элементов в образце хрома. Подобраны составы смесей для растворения, порядок добавления реагентов и параметры микроволнового разложения. Спектральные интерференции устранены с помощью применения реакционно-столкновительной ячейки. Правильность методики измерения проверена методом «введено–найдено». Диапазон определяемых содержаний составил 0,00001–0,18% (по массе).

Ключевые слова: масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, хром, определение содержания вредных примесей, микроволновая пробоподготовка.

A.V. Alekseyev, P.V. Yakimovich

Microwave sample preparation of chrome for determination of contaminants by method of ICP-MS

The technique of microwave sample preparation of chrome for determination of a mass fraction of Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb and Bi by mass spectrometry with inductively coupled plasma method (ICP-MS) is described, and also test for content of these elements in a chrome sample is carried out. Compositions of mixes for dissolution, an order of addition of reagents and parameters of microwave decomposition are chosen. Spectral interferences are eliminated by means of reaction-collision cell application. The correctness of measurement techniques is verified by the «added–found» method. Range of the determination contents made 0,00001–0,18 mass %.

Keywords: mass spectrometry with inductively coupled plasma, chrome, determination of contaminants, 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

В настоящее время хром чрезвычайно широко используется в качестве легирующего элемента при производстве самых разнообразных сталей [1], чугунов [2], алюминиевых [3], молибденовых [4] сплавов, а также жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) и других, повышая их механическую прочность, коррозионную стойкость и жаропрочность [5].

Особое место среди сплавов, при производстве которых используется хром, занимают ЖНС [6]. Жаропрочные никелевые сплавы применяют при изготовлении ответственных деталей в современной авиационной промышленности и двигателестроении. Данные детали в процессе эксплуатации испытывают огромные тепловые и силовые нагрузки, поэтому при производстве ЖНС необходимо производить контроль химического состава легирующих материалов, в том числе и хрома. Особенно важно при

этом определять содержание вредных примесей, оказывающих негативное влияние на свойства ЖНС. К числу таких примесей относятся Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi [7–11].

Одним из самых лучших методов многоэлементного анализа является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Данный метод обладает высокой чувствительностью, низкими пределами обнаружения и возможностью одновременного определения большого количества элементов [12–15]. Использование микроволновых систем разложения существенно уменьшает продолжительность растворения пробы, позволяет сократить количество используемых реагентов и вредных выбросов в атмосферу, а также уменьшить вероятность потери вещества в результате разбрызгивания при кипении растворов, а отдельные элементы уберечь от потерь при образовании летучих соединений [16].

На данный момент не существует нормативных документов, в том числе аттестованных методик, регламентирующих определение химического состава хрома методом ИСП-МС.

Таким образом, цель данной работы заключается в выборе оптимальных режимов растворения, смесей кислот для вскрытия образцов хрома (полного растворения образца и перевода исследуемых элементов в раствор) при определении массовой доли вредных примесей методом ИСП-МС.

Материалы и методы

Аппаратура

Определение содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi методом ИСП-МС выполняли на масс-спектрометре iCAP-Qc (фирма Thermo Fisher Scientific, Германия). Содержание кремния определяли в стандартном режиме STD, а содержание всех остальных элементов – в режиме с использованием реакционно-столкновительной ячейки KED. 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 ${}^7\text{Li} \geq 35000$ (имп/с)/(мкг/дм³), ${}^{115}\text{In} \geq 190000$ (имп/с)/(мкг/дм³), ${}^{238}\text{U} \geq 300000$ (имп/с)/(мкг/дм³), наименьший уровень оксидных ионов (отношение ${}^{156}\text{CeO}/{}^{140}\text{Ce} \leq 0,02$), наименьший уровень двухзарядных ионов (отношение ${}^{137}\text{Ba}^{2+}/{}^{137}\text{Ba} \leq 0,02$) в настроечном растворе, содержащем Li, In, Ba, Ce и U концентрацией 1 мкг/дм³.

Таблица 1

Параметры настройки прибора и измерений

Параметр прибора	Значение параметра
Плазмообразующий газ, л/мин	14,0
Вспомогательный газ, л/мин	0,8
Распылительный газ, л/мин	1,03
Скорость перистaltического насоса, об./мин	40
Глубина плазмоотбора, мм	5
Мощность RF генератора, Вт	1400
Число каналов на массу	1
Число сканов в реплике	30
Число реплик для образца	3
Продолжительность интегрирования (Dwelltime), с	0,01
Напряжение на экстракторе (Extraction Lens 2), В	-170
Напряжение на фокусной линзе (CCT Focus Lens), В	+2,5
Разрешение, а.е.м.	0,7
Температура распылительной камеры, °С	20
Параметры работы реакционно-столкновительной ячейки	
Расход газа*, мл/мин	5,5
Напряжение на входе в квадруполь Pole Bias, В	18
Напряжение на выходе из ячейки CCT Bias, В	22

* Газ ячейки – смесь 8% H₂, 92% He.

В процессе всех измерений использовали кварцевую циклонную распылительную камеру с термоэлектрическим охлаждением, полуразборную горелку с кварцевым инжектором $\varnothing 2,5$ мм и микропоточный концентрический тефлоновый (PFA) распылитель (Oral Mist) с номинальным расходом жидкости (скорость распыления) 400 мкл/мин.

Эксперименты по растворению хрома проводили в системе микроволнового разложения MARS 6 (фирма SEM, США) в тефлоновых автоклавах MARS Xpress Plus (фирма SEM, США) объемом 100 см³ с аварийным сбросом давления.

Изотопы определяемых элементов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Используемые изотопы и их распространенность

Определяемый элемент	Изотоп	Распространенность изотопа, %
Si	²⁸ Si	92,23
P	³¹ P	100
Fe	⁵⁷ Fe	2,20
Cu	⁶⁵ Cu	30,83
Zn	⁶⁴ Zn	48,60
As	⁷⁵ As	100
Sn	¹¹⁸ Sn	24,22
Sb	¹²¹ Sb	57,30
Pb	²⁰⁸ Pb	52,35
Bi	²⁰⁹ Bi	100

Реагенты и объекты исследования

Азотную (HNO₃) и соляную (HCl) кислоты получали с помощью суббойлерной дистилляции, исходные растворы кислот были марки «осч» в аппарате BSB-939-IR (фирма Berghof, Германия), также использовали 40% (по массе) фтористоводородную кислоту (фирма Merck, Германия). Деионизованную воду (проводимость не менее 18,2 МОм) использовали во всех экспериментах как растворитель. В качестве внутреннего стандарта во всех измерениях применяли индий концентрацией 2 мкг/л, для добавок которого использовали стандартный раствор In концентрацией 1 г/л (производства

фирмы High-Purity Standards, США). Для калибровки спектрометра (методом добавок) по Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi использовали стандартные растворы этих элементов концентрацией 1 г/л (производства фирмы High-Purity Standards, США).

В работе использовали образец хрома (X99H4), масса образца для растворения во всех экспериментах составляла 0,5 г. Использование образца меньшей массы не позволяет определять содержание вредных примесей низкой концентрации, а образец большей массы растворяется в автоклаве не полностью.

Сбор и обработку данных проводили с помощью программного обеспечения спектрометра Qtegra. Правильность методики растворения и измерения проверяли методом «введено–найдено» путем добавления стандартных растворов Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в автоклавы перед нагревом к образцу хрома таким образом, чтобы концентрация добавки соответствовала содержанию примесей Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в хrome 0,5 и 5 мг/л.

Результаты

Для растворения проб использовали смесь минеральных кислот (азотная, соляная и плавиковая), в которых хорошо растворяются отдельные элементы, входящие в состав хрома. От использования серной кислоты было решено отказаться из-за ее высокой вязкости и сложности очистки.

Проведен подбор смеси кислот для растворения никелевых сплавов.

Влияние количества азотной кислоты на растворение хрома и перевод определяемых элементов в раствор

Хром, как отдельный элемент, хорошо растворяется в соляной кислоте, но при этом соляная кислота, являясь слабым окислителем, плохо растворяет основные примеси. В данной работе в качестве окислителя использовали концентрированную азотную кислоту. Для установления влияния азотной кислоты на процесс растворения элементов образца хрома массой 0,5 г растворяли в смеси (заведомо выбран избыток соляной кислоты) вода (10 мл)+HCl (20 мл) с добавлением различного количества азотной кислоты (табл. 3). Растворение проводили в одну стадию по режиму: нагрев до 120°C в течение 15 мин, выдержка при 120°C, 20 мин.

Таблица 3

Результаты определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в хrome ($n=2, P=0,95$) при различном количестве азотной кислоты в смеси для растворения

Объем HNO ₃ , мл	Содержание элементов, % (по массе)									
	Si	P	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
0	0,09	0,0002	0,16	0,0002	0,0009	<0,00001	0,0002	<0,00001	0,00004	<0,00001
1	0,08	0,0002	0,16	0,0003	0,0009	0,00001	0,0001	<0,00001	0,0001	<0,00001
3	0,09	0,0006	0,17	0,0002	0,0010	0,00005	0,0002	0,00003	0,0004	<0,00001
5	0,10	0,0010	0,18	0,0003	0,0010	0,00007	0,0001	0,00004	0,0003	<0,00001
7	0,09	0,0011	0,18	0,0003	0,0009	0,00007	0,0002	0,00004	0,0003	<0,00001
10	0,10	0,0010	0,17	0,0002	0,0010	0,00006	0,0001	0,00004	0,0004	<0,00001

По данным табл. 3 видно, что азотная кислота способствует растворению таких элементов, как P, As, Sb и Pb. Для перевода всех определяемых элементов в раствор достаточно 5 мл азотной кислоты при массе навески 0,5 г. Отмечено также, что порядок введения кислот имеет большое значение: при добавлении сначала азотной кислоты хром пассивируется и уже не растворяется после введения соляной кислоты и нагревания. Таким образом, сначала необходимо добавлять соляную кислоту, затем произвести нагрев и, после того как автоклавы остынут, ввести азотную кислоту.

Влияние количества соляной кислоты на растворение хрома и перевод определяемых элементов в раствор

На следующем этапе работы изучали влияние соляной кислоты на процесс растворения хрома. Для этого образцы хрома массой 0,5 г растворяли в смеси вода (10 мл)+HNO₃ (5 мл) с добавлением различного количества соляной кислоты (табл. 4).

Таблица 4

Результаты определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в хrome (n=2, P=0,95) при различном количестве соляной кислоты в смеси для растворения

Объем HCl, мл	Содержание элементов, % (по массе)									
	Si	P	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
0	–*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15	0,10	0,0011	0,18	0,0004	0,0011	0,00008	0,0002	0,00004	0,0002	<0,00001
20	0,09	0,0011	0,19	0,0003	0,0009	0,00007	0,0002	0,00003	0,0003	<0,00001

* Образец хрома не растворился или растворился не полностью.

Выявлено, что при количестве соляной кислоты <15 мл образец хрома не растворяется, либо растворяется не полностью, а при количестве HCl >15 мл – изменение ее содержания в смеси не оказывает значимого влияния на степень извлечения определяемых элементов из хрома. Таким образом, для перевода всех определяемых элементов в раствор достаточно 15 мл соляной кислоты при массе навески 0,5 г.

Влияние плавиковой кислоты на растворение хрома и перевод определяемых элементов в раствор

Далее было изучено влияние плавиковой кислоты на процесс растворения хрома. Плавиковая кислота растворяет тугоплавкие элементы – Ti, Zr, Nb, Mo, Ta, W, а также часть вредных примесей, в особенности фосфор. Образцы хрома массой 0,5 г растворяли в смеси вода (10 мл)+HCl (15 мл)+HNO₃ (5 мл) с добавлением различного количества плавиковой кислоты (табл. 5).

Таблица 5

Результаты определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в хrome (n=2, P=0,95) при различном количестве плавиковой кислоты в смеси для растворения

Объем HF, мл	Содержание элементов, % (по массе)									
	Si	P	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
0	0,10	0,0010	0,17	0,0003	0,0010	0,00006	0,0002	0,00004	0,0004	<0,00001
1	0,06	0,0011	0,16	0,0002	0,0009	0,00007	0,0001	0,00004	0,0004	<0,00001
3	0,01	0,0011	0,17	0,0003	0,0010	0,00007	0,0002	0,00004	0,0004	<0,00001
5	0,005	0,0010	0,17	0,0002	0,0010	0,00006	0,0001	0,00003	0,0003	<0,00001

По данным табл. 5 видно, что наличие плавиковой кислоты в растворе уменьшает извлечение кремния, что, возможно, связано с образованием летучего соединения – тетрафторида кремния (SiF₄), который удаляется из раствора в виде газа и далее не участвует в определении содержания кремния, занижая значения его концентрации в хrome. Данный факт свидетельствует о том, что при определении содержания кремния в различных материалах, в том числе и в хrome, плавиковую кислоту для растворения использовать нельзя. На перевод остальных элементов в раствор плавиковая кислота влияния не оказывает.

Таким образом, оптимальный состав смеси для растворения образца хрома массой 0,5 г при определении содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi: вода (10 мл)+HCl (15 мл)+HNO₃ (5 мл). Сначала добавляется вода, затем – соляная кислота, далее смесь

нагревается до 120°C в течение 15 мин, выдерживается при 120°C, 20 мин и, после того как автоклавы остынут, производится добавка азотной кислоты.

**Определение содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi
методом «введено–найдено»**

Определение содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi методом «введено–найдено» проведено для добавок 0,5 и 5 мг/л искомых элементов в хrome (табл. 6).

Таблица 6

**Результаты определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi
методом «введено–найдено» (n=2, P=0,95)**

Определяемые элементы	Введенное количество элемента/его найденное значение, мг/л	
Si	0,5/0,49	5/5,45
P	0,5/0,53	5/5,62
Fe	0,5/0,47	5/5,03
Cu	0,5/0,54	5/4,85
Zn	0,5/0,48	5/5,33
As	0,5/0,56	5/4,65
Sn	0,5/0,51	5/4,79
Sb	0,5/0,51	5/5,90
Pb	0,5/0,47	5/4,77
Bi	0,5/0,44	5/4,97

Таким образом, содержание вредных примесей определяется в хrome с достаточной точностью.

Результаты испытаний образца хрома, а также погрешности определения приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi в хrome
(n=5, P=0,95)**

Образец	Содержание элементов, % (по массе)									
	Si	P	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
Хром Х99Н4	0,100	0,0010	0,18	0,00030	0,0010	0,00007	0,00010	0,000040	0,00030	<0,00001
Погрешность, % (по массе)	0,008	0,0001	0,01	0,00002	0,0001	0,00001	0,00002	0,000005	0,00004	<0,000001

Обсуждение и заключения

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- выбраны условия микроволновой пробоподготовки хрома для определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi методом ИСП-МС;
- хром полностью растворяется в смеси вода (10 мл)+HCl (15 мл)+HNO₃ (5 мл), определяемые элементы при этом полностью переходят в раствор. Навеска хрома при растворении составляла 0,5 г;
- установлен следующий порядок растворения хрома: сначала добавляется вода, затем – соляная кислота, далее смесь нагревается до 120°C в течение 15 мин, выдерживается при 120°C, 20 мин и, после того как автоклавы остынут, производится добавка азотной кислоты;
- показана возможность точного определения содержания Si, P, Fe, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Pb и Bi (в диапазоне концентрации от 0,00001–0,18% (по массе)) в хrome методом ИСП-МС с применением реакционно-столкновительной ячейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реформатская И.И., Подобаев А.Н., Шилов Д.С., Чибышева Д.В., Артамонов О.Ю. Роль хрома в коррозионно-электрохимическом поведении углеродистых сталей //Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 4. №1. С. 89–96.
2. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Столяров А.М. Выбор нового состава жароизносостойкого чугуна //Литейное производство. 2013. №6. С. 2–7.
3. Литейный сплав на основе алюминия: пат. 2385358 Рос. Федерация; опубл. 27.03.10.
4. Сплав для изготовления штампового инструмента: пат. 2392341 Рос. Федерация; опубл. 20.06.10.
5. Амирханова Н.А., Хамзина А.Р. Повышение коррозионной стойкости сплава ЭП648к высокотемпературной газовой коррозии //Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. №36. С. 38–48.
6. 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.
7. 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).
8. Мин П.Г., Сидоров В.В. Опыт переработки литейных отходов сплава ЖС32-ВИ на научно-производственном комплексе ФГУП «ВИАМ» по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 20–25.
9. 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.
10. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
11. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS //Mikrochim. Acta. 2001. V. 137. P. 149–155.
13. Лейкин А.Ю., Якимович П.В. Системы подавления спектральных интерференций в масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой //Журнал аналитической химии. 2012. Т. 67. №8. С. 752–762.
14. МИ 1.2.052–2013. Методика измерений массовой доли примесей Р, Мn, Fe, Cu, Zn, Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi в никелевых сплавах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.
15. Пупышев А.А., Суриков В.Т. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Образование ионов. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 276 с.
16. Тормышева Е.А., Смирнова Е.В., Ермолаева Т.Н. Определения оксидов железа (III), кальция и алюминия в магнизиальных огнеупорах методом АЭС с ИСП в условиях микроволнового разложения пробы //Вестник Воронежского государственного университета. 2010. №1. С. 51–55.

REFERENCES LIST

1. Reformatskaya I.I., Podobaev A.N., Shilov D.S., Chibysheva D.V., Artamonov O.Ju. Rol hroma v korrozionno-elektrohimicheskom povedenii uglerodistyh stalej [Chrome role in corrosion and electrochemical behavior carbonaceous the steel] //Izvestija MGTU «МАМИ». 2013. Т. 4. №1. S. 89–96.
2. Kolokolcev V.M., Golcov A.S., Stolyarov A.M. Vybora novogo sostava zharoiznosostojkogo chuguna [Choice of new composition of heat and wear resistant cast iron] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №6. S. 2–7.
3. Litejnyj spлав na osnove alyuminiya [Foundry alloy on the basis of aluminum]: pat. 2385358 Ros. Federaciya; opubl. 27.03.10.
4. Spлав dlya izgotovleniya shtampovogo instrumenta [Alloy for production of the stamp tools]: pat. 2392341 Ros. Federaciya; opubl. 20.06.10.

5. Amirhanova N.A., Hamzina A.R. Povyshenie korrozionnoj stojkosti splava JeP648k vysokotemperaturnoj gazovoj korrozii [Increase of corrosion resistance of alloy EP648k of high-temperature gas corrosion] //Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tehnika. 2014. №36. S. 38–48.
6. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [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. №1 (34). S. 3–33.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemelnye elementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
8. Min P.G., Sidorov V.V. Opyt pererabotki litejnyh othodov splava ZhS32-VI na nauchno-proizvodstvennom komplekse FGUP «VIAM» po izgotovleniyu lityh prutkovykh (shihtovykh) zagotovok [The experience of GS32-VI alloy scrap recycling at the VIAM scientific and production complex for cast bars production] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 20–25.
9. 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 [Development of process of the directed crystallization of shovels of GTE of heat resisting alloys with single-crystal and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
10. Min P.G., Sidorov V.V. Rafinirovanie othodov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS32-VI ot primesi kremniya v usloviyah vakuumnoj indukcionnoj plavki [Refining of scrap of Ni-base superalloy GS32-VI to eliminate silicon impurity under conditions of vacuum induction melting] //Trudy VIAM. 2014. №9. St. 01 (viam-works.ru).
11. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennykh zharoprochnykh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [Creation of modern heat resisting materials and technologies of their production for aviation engine-building] //Krylja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
12. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS //Mikrochim. Acta. 2001. V. 137. P. 149–155.
13. Lejkin A.Ju., Jakimovich P.V. Sistemy podavleniya spektralnykh interferencij v mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Systems of suppression of spectral interferences in mass spectrometry with inductively connected plasma] //Zhurnal analiticheskoy himii. 2012. T. 67. №8. S. 752–762.
14. MI 1.2.052–2013. Metodika izmerenij massovoj doli primesej P, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi v nikelovykh splavah metodom mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Measurement technique of a mass fraction of impurity P, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi in nickel alloys by a mass spectrometry method with inductively connected plasma].
15. Pupyshv A.A., Surikov V.T. Mass-spektrometriya s induktivno svjazannoj plazmoj. Obrazovanie ionov [Mass spectrometry with inductively connected plasma. Formation of ions]. Ekaterinburg: UrO RAN. 2006. 276 s.
16. Tormysheva E.A., Smirnova E.V., Ermolaeva T.N. Opredeleniya oksidov zheleza (III), kalciya i alyuminiya v magnezialnykh ogneuporah metodom AJeS s ISP v usloviyah mikrovolnovogo razlozheniya probe [Definitions of oxides of iron (III), calcium and aluminum in magnesian refractory materials by method of the NPP with ISP in the conditions of microwave decomposition of test] //Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. №1. S. 51–55.