



УДК 669.85:543.51

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-9-9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛЛИЯ, ГЕРМАНИЯ, МЫШЬЯКА И
СЕЛЕНА В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ,
МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ РЗМ, МЕТОДОМ ИСП-МС**

П.В. Якимович

А.В. Алексеев

кандидат биологических наук

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.

П.В. Якимович¹, А.В. Алексеев¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛЛИЯ, ГЕРМАНИЯ, МЫШЬЯКА И СЕЛЕНА В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ, МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ РЗМ, МЕТОДОМ ИСП-МС

Жаропрочные никелевые сплавы широко применяются в современной авиационной промышленности и двигателестроении. Из них изготавливаются ответственные детали, испытывающие огромные тепловые и силовые нагрузки. При этом важной задачей является контроль химического состава никелевых сплавов, в особенности содержания микропримесей, к которым относятся галлий, германий, мышьяк и селен.

В работе проведено определение содержания галлия, германия, мышьяка и селена в сертифицированных стандартных образцах (СО) никелевых сплавов, микролегированных РЗМ, методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Приведена методика растворения пробы и подготовки ее к анализу. Спектральные интерференции устранены с помощью уравнений математической коррекции. Пределы обнаружения составили, % (по массе): 0,000002 Ga, 0,000002 Ge, 0,00003 Se и 0,00004 As, диапазон определяемых концентраций: 0,000009–0,0023% (по массе), относительное стандартное отклонение не превышает 0,05.

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

P.V. Yakimovich, A.V. Alekseev

DETERMINATION OF GALLIUM, GERMANIUM, ARSENIC AND SELENIUM CONTENTS IN HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS MICROALLOYED BY REM USING ICP-MS

Heat-resistant nickel alloys are widely applied in the modern aviation industry and engine building. Some critical components subjected to huge thermal and power loadings are made of them. Thus, an important task is to control chemical composition of nickel-based alloys, in

particular the content of trace constituents, which include gallium, germanium, arsenic and selenium.

Gallium, germanium, arsenic and selenium content in certified reference samples of nickel alloys microalloyed by REM was determined using mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS). The method of dissolution of a sample and its preparation for analysis was described. Spectral interferences were eliminated using the equations of mathematical correction. The detection limits (% mass.) were as follows: Ga – 0,000002, Ge – 0,000002, Se – 0,00003, As – 0,00004. The range of the defined concentrations was 0,000009–0,0023% mass., the relative standard deviation of not higher than 0,05.

Keywords: *inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS, nickel alloys, determination of gallium, determination of germanium, determination of arsenic, determination of selenium, 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 современной авиационной промышленности и двигателестроении жаропрочные никелевые сплавы применяются при изготовлении ответственных деталей, испытывающих при эксплуатации огромные тепловые и силовые нагрузки [1–5]. В данные сплавы все чаще стали вводить микродобавки редкоземельных металлов (РЗМ), которые позволяют при выплавке уменьшить содержание вредных микропримесей, ухудшающих свойства никелевых сплавов [6–10]. В связи с этим к таким сплавам предъявляются повышенные требования по химическому составу, в особенности к содержанию микропримесей, к которым относятся галлий, германий, мышьяк и селен.

Спектрофотометрия является классическим методом определения содержания примесей галлия, германия, мышьяка и селена в металлах и сплавах. Наличие галлия в сплаве определяют по образованию розового комплекса с родамином С. Далее данный комплекс экстрагируют смесью бензола с бутилацетатом и измеряют светопоглощение экстракта при длине волны 564 нм [11]. Германий можно перевести в комплексное соединение метиленового синего с 12-молибдогерманатом со светопоглощением при длине волны 660 нм [12]. Наличие мышьяка в сплаве определяют по образованию

желтого мышьяково-молибденового комплекса с последующим восстановлением его серноокислым 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]. Определение содержания вредных примесей в сплаве методом спектрофотометрии отличается большой трудоемкостью и не позволяет проводить одновременное определение необходимых для анализа элементов.

В настоящее время одним из самых лучших методов многоэлементного анализа является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Этот метод характеризуется высокой чувствительностью, низкими пределами обнаружения и возможностью одновременного определения большого количества элементов [15, 16]. Прямое масс-спектрометрическое определение содержания галлия, германия, мышьяка и селена в сложнолегированных никелевых сплавах не всегда возможно вследствие проявления масс-спектральных интерференций – в основном оксидных ионов кобальта и хрома и двухзарядных ионов РЗМ (при наличии в исследуемом образце РЗМ) [16]. Масс-спектральные интерференции оксидных и двухзарядных ионов частично устраняются в реакционно-столкновительной ячейке или путем математической коррекции [16, 17]. Устранить полностью масс-спектральные интерференции возможно только при отделении определяемых элементов от основы сплава путем использования гидридной генерации паров [18], но данный процесс является более трудоемким (требует более длительной и сложной пробоподготовки) по сравнению с обычной масс-спектрометрией и связан с появлением дополнительных интерференций на стадии образования гидридов [18].

Необходимо упомянуть также о методе ИСП-МС высокого разрешения [19], который подходит для определения содержания галлия, германия, мышьяка и селена в никелевых сплавах, но имеет недостатки, такие как высокая стоимость оборудования и низкая чувствительность определения искоемых элементов (особенно Se) в режиме высокого разрешения.

Таким образом, цель данной работы заключается в повышении точности определения содержания галлия, германия, мышьяка и селена в никелевых сплавах, микролегированных РЗМ, методом ИСП-МС путем преодоления спектральных интерференций и выбора оптимальных условий измерений.

Материалы и методы

Аппаратура

Определение содержания галлия, германия, 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 ${}^7\text{Li} \geq 35000$, ${}^{115}\text{In} \geq 190000$ и ${}^{238}\text{U} \geq 300000$ (имп/с)/(мкг/дм³), наименьший уровень оксидных ионов ${}^{156}\text{CeO}/{}^{140}\text{Ce} \leq 0,015$ и двухзарядных ионов (отношение ${}^{137}\text{Ba}^{2+}/{}^{137}\text{Ba} \leq 0,02$) в настроечном растворе, содержащем Li, In, Ba, Ce и U с концентрацией 1 мкг/дм³.

Таблица 1

Параметры настройки прибора и измерений

Параметр прибора	Значение параметра
Плазмообразующий газ, л/мин	14
Вспомогательный газ, л/мин	0,8
Распылительный газ, л/мин	0,93
Скорость перистaltического насоса, об./мин	30
Глубина плазмоотбора, мм	5
Мощность RF генератора, Вт	1350
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
Номинальный расход жидкости через микропоточный концентрический PFA-ST распылитель, мкл/мин	400
Температура распылительной камеры, °С	2,7

В процессе всех измерений использовали кварцевую циклонную распылительную камеру с термоэлектрическим охлаждением и полуразборную горелку с кварцевым инжектором $\varnothing 2,5$ мм. Для растворения пробы при нагревании применяли микроволновую систему MARS 6 (фирмы SEM, США) в тefлоновых автоклавах MARS Xpress Plus (фирмы SEM, США) объемом 100 см³ с аварийным сбросом давления.

Реагенты и объекты исследования

Очистку HNO_3 и HCl проводили с помощью суббойлерной дистилляции в аппарате BSB-939-IR (фирмы Berghof, Германия), исходные растворы кислот были марки «осч», также использовали 40% (по массе) фтористоводородной кислоты (фирмы Merck, Германия). Деионизованную воду (проводимость не менее 18,2 МОм) использовали во всех экспериментах как растворитель. Стандартные растворы галлия, германия, мышьяка и селена с концентрацией 1 мг/л приготовлены из стандартных растворов 1000 мг/л (производства фирмы High-Purity Standards, США) путем последовательного десятикратного разбавления водой. Использовали также стандартный раствор Eu с концентрацией 1000 мг/л (производства фирмы High-Purity Standards, США), рабочие растворы Eu с концентрацией 0,2 мг/л готовили путем последовательного разбавления водой.

В работе использовали изготовленные в ВИАМ сертифицированные стандартные образцы (СО) состава сплавов типа ВЖМ: ВЖМП-1, ВЖМП-2, ВЖМП-7. Образец ВЖМП-7 был микролегирован РЗМ. Все приведенные выше сплавы – на никелевой основе.

Пробоподготовка образцов

Образцы сплавов ВЖМП-1, ВЖМП-2, ВЖМП-7 массой по 0,5 г (каждый) растворяли в смеси: вода (10 мл)+ HNO_3 (8 мл)+ HF (2 мл), при нагревании в микроволновой системе при 120°C в течении 20 мин. Такая схема растворения пригодна для никелевых сплавов с низким содержанием хрома и тугоплавких элементов (Mo, W, Ta, Nb) [20–22].

Для построения градуировочных зависимостей интенсивностей сигналов от концентрации искомых элементов использовали метод стандартных добавок. Внутренний стандарт Eu применяли для коррекции временного дрейфа сигнала в течение измерений и матричного влияния компонентов основы сплава на интенсивность сигналов определяемых элементов, тем самым повышая точность результатов анализа.

Сбор и обработку данных проводили используя программное обеспечение спектрометра Qtegra.

Результаты и обсуждение

Определение содержания Ga, Ge, Se и As в стандартных образцах никелевых сплавов

На первом этапе проведено определение содержания Ga, Ge, Se и As в интервале концентраций 0,000009–0,0011% (по массе) в двух сертифицированных стандартных образцах – из сплавов ВЖМП-1 и ВЖМП-2, которые не были микролегированны РЗМ.

Таблица 2

Результаты определения содержания галлия и германия в стандартных образцах никелевого сплава при использовании внутреннего стандарта ($n=4, P=0,95$)

Стандартный образец	Содержание элементов, % (по массе) при использовании внутреннего стандарта	
	Ga	Ge
Сплав ВЖМП-1	0,000053±0,000002	0,000010±0,000002
Аттестованные значения	0,000055±0,000013	0,000009±0,000003
Сплав ВЖМП-2	0,000303±0,000006	0,000285±0,000009
Аттестованные значения	0,00036±0,00002	0,00029±0,00003

Таблица 3

Результаты определения содержания мышьяка и селена в стандартных образцах никелевого сплава при использовании внутреннего стандарта ($n=4, P=0,95$)

Стандартный образец	Содержание элементов, % (по массе) при использовании внутреннего стандарта	
	As	Se
Сплав ВЖМП-1	0,00020±0,00004	0,00006±0,00003
Аттестованные значения	0,00020±0,00002	0,00002
Сплав ВЖМП-2	0,00063±0,00003	0,0012±0,0001
Аттестованные значения	0,00060±0,00022	0,00110±0,00011

По данным табл. 2 и 3 видно, что при определении содержания данных примесей по аттестованной методике измерений, не учитывающей влияния РЗМ [22], достигается соответствие найденного и аттестованного значения СО.

Определение содержания Ga, Ge, Se и As в стандартном образце никелевого сплава, микролегированного РЗМ

Изотопы определяемых элементов, создающие помехи ионы и уравнения коррекции приведены в табл. 4.

Таблица 4

Изотопы определяемых элементов, основные интерференции и коэффициенты уравнений коррекции для масс-спектрометрического определения содержания Ga, Ge, As и Se

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Ионы, создающие помехи	Уравнение коррекции
⁷¹ Ga	39,89	¹⁴² Ce ²⁺ , ¹⁴² Nd ²⁺	$^{71}\text{Ga} = 71\text{M} - (0,0039 \times ^{140}\text{Ce} \times 11,114/88,449 + 0,00187 \times ^{146}\text{Nd} \times 27,16/17,17)$
⁷² Ge	27,4	¹⁴⁴ Nd ²⁺	$^{72}\text{Ge} = 72\text{M} - (0,00187 \times ^{146}\text{Nd} \times 23,83/17,17)$
⁷⁵ As	100	¹⁵⁰ Nd ²⁺	$^{75}\text{As} = 75\text{M} - (0,00187 \times ^{146}\text{Nd} \times 5,62/17,17)$
⁸² Se	8,73	¹⁶⁴ Dy ²⁺ , ¹⁶⁴ Er ²⁺	$^{82}\text{Se} = 82\text{M} - (0,00055 \times ^{163}\text{Dy} \times 28,19/24,9 + 0,00064 \times ^{166}\text{Er} \times 1,609/33,61)$

Проведено определение содержания Ga, Ge, Se и As в интервале концентраций 0,00099–0,0023% (по массе) в сертифицированном стандартном образце из сплава ВЖМП-7, микролегированном РЗМ, и четырех модельных растворах, приготовленных на основе стандартного образца из сплава ВЖМП-1 с добавкой 100 мкг/л (конечная концентрация элементов в анализируемых растворах) Се, Nd, Dy и Ер (каждого). Определение содержания примесей выполнялось как с использованием уравнений математической коррекции, так и без них (табл. 5 и 6).

Таблица 5

Результаты определения содержания галлия и германия в стандартных образцах никелевого сплава при использовании уравнений математической коррекции и без них (n=4, P=0,95)

Стандартный образец	Содержание элементов, % (по массе)			
	при использовании уравнений математической коррекции		без использования уравнений математической коррекции	
	Ga	Ge	Ga	Ge
Сплав ВЖМП-7 (0,057 Се; 0,057 Nd; 0,047 Dy; 0,041 Ер)*	0,000068	0,000002	0,000101	0,000066
Сплав ВЖМП-1: – без добавок РЗМ – с добавкой РЗМ по 100 мкг/л (каждого):	0,000053	0,000010	0,000053	0,000010

Ce, Nd, Dy, Er	0,000049	0,000005	0,000167	0,000183
Ce	0,000055	0,000008	0,000103	0,000010
Dy, Nd	0,000047	0,000004	0,000118	0,000182
Er	0,000052	0,000008	0,000053	0,000010

* В скобках указаны аттестованные значения содержания РЗМ в % (по массе).

Таблица 6

Результаты определения содержания мышьяка и селена в стандартных образцах никелевого сплава при использовании уравнений математической коррекции и без них (n=4, P=0,95)

Стандартный образец	Содержание элементов, % (по массе)			
	при использовании уравнений математической коррекции		при использовании уравнений математической коррекции	
	As	Se	As	Se
Сплав ВЖМП-7 (0,057 Ce; 0,057 Nd; 0,047 Dy; 0,041 Er)*	0,00040	0,00032	0,00043	0,00113
Сплав ВЖМП-1:				
– без добавок РЗМ	0,00020	0,00006	0,00020	0,00006
– с добавкой РЗМ по 100 мкг/л (каждого):				
Ce, Nd, Dy, Er	0,00038	0,00053	0,00045	0,00179
Ce	0,00036	0,00007	0,00036	0,00008
Dy, Nd	0,00034	0,00053	0,00041	0,00169
Er	0,00029	0,00006	0,00030	0,00015

* В скобках указаны аттестованные значения содержания РЗМ в % (по массе).

По данным табл. 5 и 6 видно, что наиболее точным является определение содержания примесей при использовании уравнений математической коррекции, при этом достигается лучшее соответствие найденных и аттестованных значений концентраций Ga, Ge, As, Se в образцах из сплава ВЖМП-1 без добавок РЗМ и в модельных растворах с добавками РЗМ. Наилучшие результаты получены при определении содержания ^{72}Ge с коррекцией по ^{146}Nd (без учета масс-спектральной интерференции иона $^{144}\text{Nd}^{2+}$ на ^{72}Ge значения концентрации германия при определении его содержания в сплаве могут быть завышены в 18 раз).

Пределы обнаружения Ga, Ge, Se и As никелевых сплавах

В экспериментах с концентрацией растворенного вещества 1 г/л пределы обнаружения составили, в % (по массе): 0,000002 Ga, 0,000002 Ge, 0,00004 As и 0,00003 Se.

Заключение

Показана возможность более точного определения содержания галлия, германия, мышьяка и селена (в диапазоне от 0,000009–0,0023% (по массе)) в никелевых сплавах, микролегированных РЗМ, методом ИСП-МС с применением математической коррекции интерференций.

Спектральные интерференции, создающие помехи при определении галлия, германия, мышьяка и селена, практически полностью устраняются при использовании уравнений математической коррекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. 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.
3. 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.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин (продолжение) //Материаловедение. 2000. №3. С. 38–43.
5. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23–34.
6. Каблов Е.Н. Физико-механические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений //Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2005. Т. 46. №3. С. 155–167.
7. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al //Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.

9. Сидоров В.В., Тимофеева О.Б., Калицев В.А., Горюнов А.В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 8–13.
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. ГОСТ 11739.26–90. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения галлия.
12. Mirzoyan F.V., Tarayan V.M., Hairyan E.K. Sensitive spectrophotometric determination of germanium as methylene blue 12-molybdo germanate //Analytica Chimica Acta. 1981. V. 124. P. 185–192.
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. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS //Mikrochim. Acta. 2001. V. 137. P. 149–155.
16. 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.
17. 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.
18. Gao Y., Liu R. et al. Application of chemical vapor generation in ICP-MS: A review //Chin Sci Bull. 2013. V. 58. P. 1980–1991.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. МИ 1.2.052–2013. Методика измерений массовой доли примесей P, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi в никелевых сплавах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. М.: ВИАМ. 2013.

REFERENCES LIST

1. 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 of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih perera-botki 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.
3. 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.
4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Vasilenok L.B., Morozova G.I. Renij v zharoprochnyh nikelovyh splavah dlja lopatok gazovyh turbin (prodolzhenie) [Rhenium in nickel superalloys for gas turbine blades (continued)] //Materialovedenie. 2000. №3. S. 38–43.
5. Kablov E.N., Logunov A.V., Sidorov V.V. Mikrolegirovanie RZM – sovremennaja tehnologija povyshenija svojstv litejnyh zharoprochnyh nikelovyh splavov [Microalloying REM - modern technology improve the properties of heat-resistant nickel alloys casting] //Perspektivnye materialy. 2001. №1. S. 23–34.
6. Kablov E.N. Fiziko-mehaničeskie i tehnologičeskie osobennosti sozdanija zharoprochnyh splavov, sodержashhih renij [Physical, mechanical and technological features of the creation of high-temperature alloys containing rhenium] //Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2. Himija. 2005. T. 46. №3. S. 155–167.
7. Kablov E.N., Buntushkin V.P., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Morozova G.I., Kazanskaja N.K. Malolegirovannye legkie zharoprochnye vysokotemperaturnye materialy na osnove intermetallida Ni_3Al [Low-alloy high-temperature heat-resistant lightweight materials based on the intermetallic compound Ni_3Al] //Metally. 1999. №1. S. 58–65.
8. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M. Osobennosti legirovanija i termičeskoj ob-rabotki zharoprochnyh nikelovyh splavov dlja diskov gazoturbinyh dvigatelej novogo pokolenija [Features alloying and heat treatment of heat-resistant nickel alloys for disks of gas turbine engines of the new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 3–8.
9. Sidorov V.V., Timofeeva O.B., Kalicev V.A., Gorjunov A.V. Vlijanie mikrolegirovanija RZM na svojstva i strukturno-fazovye prevrashhenija v intermetallidnom splave VKNA-25-VI [Effect of microalloying REM on the properties and structural phase transformations in intermetallic alloys VKNA-25-VI] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 8–13.
10. Min P.G., Sidorov V.V. Rafinirovanie othodov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS32-VI ot primesi kremnija v uslovijah vakuumnoj indukcionnoj plavki [Refining of nickel superalloys

- ZHS32-VI of silicon impurities in a vacuum induction melting] //Trudy VIAM. 2014. №9. St. 01 (viam-works.ru).
11. GOST 11739.26–90. Splavy aljuminievye litejnye i deformiruemye. Metody opredelenija gallija [Aluminum casting alloys and wrought. Methods for determination of gallium].
 12. Mirzoyan F.V., Tarayan V.M., Hairyan E.K. Sensitive spectrophotometric determination of germanium as methylene blue 12-molybdo germanate //Analytica Chimica Acta. 1981. V. 124. P. 185–192.
 13. GOST 6689.13–92. Nikel', splavy nikel'evye i medno-nikel'evye. Metody opredelenija mysh'jaka [Nickel, nickel and copper-nickel. Methods for determination of arsenic].
 14. GOST 13047.25–2002. Nikel'. Kobal't. Metody opredelenija svena v nikel'e [Nickel. Cobalt. Methods for determination of selenium in nickel].
 15. Hu J., Wang H. Determination of Trace Elements in Super Alloy by ICP-MS //Mikrochim. Acta. 2001. V. 137. P. 149–155.
 16. Pupyshv A.A., Jepova E.N. Spektral'nye pomehi poliatomnyh ionov v metode mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Spectral interference polyatomic ions in mass spectrometry with inductively coupled plasma] //Analitika i kontrol'. 2001. T. 5. №4. S. 335–369.
 17. Lejkin A.Ju., Jakimovich P.V. Sistemy podavlenija spektral'nyh interferencij v mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Spectral interferences suppression system in mass spectrometry with inductively coupled plasma] //Zhurnal analiticheskoj himii. 2012. T. 67. №8. S. 752–762.
 18. Gao Y., Liu R. et al. Application of chemical vapor generation in ICP-MS: A review //Chin Sci Bull. 2013. V. 58. P. 1980–1991.
 19. 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.
 20. 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 determination of Si, P, V, Cr, Mn, Ni, Cu, W ICP-AES method for structural steels] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2014. T. 80. №1. S. 12–15.
 21. Dvoreckov R.M., Karachevcev F.N., Zagvozdina T.N., Mehanik E.A. Opredelenie legirujushhijh jelementov nikel'evykh splavov aviacionnogo naznachenija metodom AJeS-ISP v sochetanii s mikrovolnovoj probopodgotovkoj [Determination of alloying elements nickel alloys aviation applications by ICP-AES combined with microwave sample preparation] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika ma-terialov. 2013. T. 79. №9. S. 6–9.
 22. MI 1.2.052–2013. Metodika izmerenij massovoj doli primesej R, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi v nikel'evykh splavah metodom mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj [Method for determination of mass fraction of impurities P, Mn, Fe, Cu, Zn,

Ga, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Tl, Pb, Bi in nickel alloys by mass spectrometry with inductively coupled plasma]. M.: VIAM. 2013.