



УДК 620.1.08:669.018.44:669.245
doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-9-9

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКИ АНАЛИЗА
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Ф.Н. Карачевцев
кандидат химических наук

Т.Н. Загвоздкина

Г.В. Орлов

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.

Ф.Н. Карачевцев¹, Т.Н. Загвоздкина¹, Г.В. Орлов¹

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-9-9

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) являются одними из перспективных материалов, которые применяются в авиационном материаловедении для изготовления широкой номенклатуры деталей и конструкций различного назначения. Повышение уровня жаропрочности ЖНС зависит от условий их изготовления и химического состава. В связи с этим контроль состава ЖНС в процессе их производства методом экспресс-анализа является крайне актуальной задачей. Разработанная методика опико-эмиссионного анализа обеспечивает относительную погрешность при определении содержания легирующих элементов не более 5% при значениях массовой доли более 1%.

Ключевые слова: методика измерений, никелевые сплавы, метрологические характеристики, опико-эмиссионный метод.

F.N. Karachevtsev, T.N. Zagvozdina, G.V. Orlov

Development and research of metrological characteristics of express-analysis of heat-resistant nickel alloys

Heat-resistant nickel alloys (HRNA) are one of the promising materials, which are used in aviation engineering for manufacture of a wide range of parts and structures for various purposes. Improvement in heat resistance of HRNA depends on the conditions of their production and chemical composition. In this regard control of the composition of HRNA in the process of their production by method of express-analysis is an extremely important problem.

The developed method of optical emission analysis provides relative error at determination of the content of alloying elements not more than 5% at values of the mass fraction of more than 1%.

Key words: measurement technique, nickel alloys, the metrological characteristics, optical emission method.

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 современном авиационном материаловедении широко применяются жаропрочные никелевые сплавы. При разработке новых перспективных жаропрочных сплавов на основе никеля повышение уровня жаропрочности обеспечивается условиями их получения и изменением химического состава [1–3], которые влияют на фазовый состав получаемых материалов, а следовательно, и на служебные характеристики [4–9]. В составе современных авиационных сплавов на никелевой основе может одновременно присутствовать большое количество как легирующих элементов (Al, Co, Cr, Ti, Re, Ru, Mo, Ta, W, Nb, Zr), так и примесей (Si, B, La, Ce, Y, V, Mn, Cu, Fe, P) [10–12]. Принимая во внимание то, что чем более точно производится оценка химического состава сплавов, тем менее вариативен его фазовый состав и уже диапазон получаемых значений служебных характеристик, для контроля химического состава новых перспективных никелевых сплавов необходимо использовать методики измерений массовых долей ле-

гирующих элементов и примесей, обеспечивающие высокую точность проведения анализа, адаптированные для новейшего оборудования.

В настоящее время в России и за рубежом для экспресс-определения химического состава при производстве никелевых сплавов применяют оптико-эмиссионный метод. Метод основан на зависимости интенсивности характеристических линий элемента от его массовой доли в образце. Возбуждаемое искровым разрядом характеристическое излучение элементов пробы разлагается в спектр с последующим измерением интенсивности аналитических спектральных линий и определением массовой доли элементов с помощью градуировочных характеристик.

Однако применяемые в настоящее время методики (нормативные документы) измерений устарели и требуют пересмотра в соответствии с введением и изменениями в ФЗ-102. В связи с этим весьма актуальной становится задача разработки экспресс-методики измерений массовой доли легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах оптико-эмиссионным методом анализа.

Материалы и методы

Исследования проводили на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460 с искровым генератором.

С помощью наждачной бумаги различной зернистости подготовлена поверхность образцов и измерена величина их шероховатости на профилометре. Условия проведения измерений следующие: продолжительность предварительной продувки аргоном перед измерением 2 с, продолжительность предварительного обжига образца 8 с, продолжительность обжига 5 с; настройки генератора прибора задаются производителем оборудования.

Эксперимент по оценке прецизионности и правильности методики проводился различными операторами на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460 с использованием следующих вспомогательных устройств и реактивов:

– ГСО 09928–2011 «Утвержденного типа стандартные образцы состава литейного жаропрочного рений-рутениевого сплава на никелевой основе ВЖМ4-ВИ»;

– ГСО 10124–2012 «Утвержденного типа стандартные образцы состава сплава ВЖМ5У»;

– ГСО 10125–2012 «Утвержденного типа стандартные образцы состава деформируемого сплава ВЖ172»;

– ГСО 10126–2012 «Утвержденного типа стандартные образцы состава деформируемого сплава ВЖ175-ИД»;

– ГСО 9573–2010 «Стандартные образцы состава жаропрочного интерметаллидного никелевого сплава типа ВКНА-25»;

– ГСО 9930–2011 «Утвержденного типа стандартные образцы состава жаропрочного интерметаллидного сплава ВКНА-1В»;

– ОСО 1-92/5–92 «Комплект стандартных образцов для проведения спектрального анализа сплава типа ВКНА-1В»;

– ОСО 8–2012 «Отраслевой стандартный образец состава жаропрочного никелевого сплава марки ВЖЛ2»;

– СОП 1-04/5–04 «Стандартные образцы предприятия (СОП) состава жаропрочного никелевого сплава типа ВКНА-4У»;

– СОП 25-05/29–05 «Комплект стандартных образцов предприятия (СОП) состава никелевого сплава типа ЖС32, ЖС32У»;

– СОП 16-04/20–04 «Комплект стандартных образцов предприятия (СОП) состава никелевого сплава типа ЖС6УМ»;

– СОП 11-04/15–04 «Комплект стандартных образцов предприятия (СОП) состава никелевого сплава типа ЖС36ВН»;

- стандартный образец на основе никеля MBN 24X WASP3;
- стандартный образец на основе никеля PYRO 60A;
- стандартный образец на основе никеля ALLOY 600 IARM 53E;
- стандартный образец на основе никеля MBN 28X 6253;
- стандартный образец на основе никеля BS 625A;
- стандартный образец на основе никеля BS 200-3;
- стандартный образец на основе никеля MBN 212X 4006;
- стандартный образец на основе никеля ALLOY X IARM 69D;
- стандартный образец на основе никеля MNB 219X 1867;
- стандартный образец на основе никеля MNB 215X HB3;
- стандартный образец на основе никеля MNB 212X 4007;
- станок плоскошлифовальный HERZOG (2800 об./мин);
- станок отрезной с водяным охлаждением Struers (2800 об./мин).

Измеряемые объекты находились в одном и том же месте, все исследования проведены в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002 в условиях повторяемости. Для каждого стандартного образца (СО) проведены четыре серии (в разное время) по шесть параллельных измерений массовой доли элементов в соответствии с проектом методики измерений.

На основании данных из научно-технической и справочной литературы, а также предполагаемого содержания элементов в никелевых сплавах выбраны аналитические линии для определения легирующих элементов и примесей (табл. 1).

Таблица 1

Аналитические линии для определения содержания легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах

Элемент (уровень)	Содержание элементов, % (по массе)		Линия, нм	Элемент (уровень)	Содержание элементов, % (по массе)		Линия, нм
	минимум	максимум			минимум	максимум	
Al	0,001	6,5	308,22	Mn- <i>H</i>	0,01	25,0	263,82
B	0,0005	0,2	182,64	Mo	0,001	7,0	281,62
C	0,01	2,5	193,09	Mo- <i>H</i>	1,0	35,0	369,26
Ca	0,0001	0,01	396,85	Nb	0,002	8,0	319,50
Ce	0,0001	0,3	399,92	Ni	50,0	90,0	243,79
Co	0,002	3,5	228,62	P	0,001	0,1	178,29
Co- <i>H</i>	0,005	20,0	258,03	Re	0,05	10,0	346,43
Cr	0,001	3,0	267,72	S	0,001	0,2	180,73
Cr- <i>H</i>	0,1	35,0	298,92	Sb	0,001	0,1	217,58
Cu	0,5	35,0	224,26	Si	0,002	8,0	212,41
Cu- <i>L</i>	0,001	0,5	327,40	Sn	0,003	0,1	189,99
Fe	0,002	3,0	371,99	Ta	0,01	5,0	240,06
Fe- <i>H</i>	1,0	50,0	273,07	Ti	0,01	6,0	377,28
Hf	0,002	1,0	277,33	V	0,005	2,0	311,07
La	0,0001	0,5	394,91	W	0,01	15,0	220,45
Mg	0,001	0,3	279,08	Y	0,0001	0,5	360,07
Mn	0,007	3,0	293,31	Zr	0,002	0,3	349,62

Результаты

Проведено исследование влияния шероховатости поверхности (R_z) на результаты определения содержания легирующих элементов и примесей в никелевом сплаве типа ВЖМ5 и рассчитаны стандартные среднеквадратические отклонения (СКО) полученных результатов (табл. 2 и 3).

Таблица 2

**Влияние шероховатости поверхности на СКО результатов
определения содержания легирующих элементов и примесей**

R_z , мкм	Значения СКО по элементам, % (отн.)													
	Al	B	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	P	Re	Si	Ta	Ti	W
40,2	1,4	3,0	0,8	0,8	8,7	7,4	1,1	2,8	3,7	1,7	6,5	1,5	1,4	0,9
17,2	3,3	1,8	0,7	0,7	4,6	2,8	0,5	1,2	2,9	1,6	3,8	0,8	0,6	0,9
14,6	1,9	1,1	0,3	0,5	5,4	4,1	0,6	1,1	2,2	1,8	3,6	0,2	0,5	0,6
14,7	1,3	1,4	0,5	0,6	4,0	3,8	0,5	1,1	2,6	1,0	2,7	0,9	0,7	0,7
14,5	1,3	1,6	0,9	0,3	3,8	4,6	0,7	1,6	1,9	1,6	3,4	0,5	0,9	1,1
6,5	2,3	1,9	0,7	0,8	5,2	5,0	0,9	1,1	1,9	2,3	2,5	0,9	0,5	0,6
5,8	2,1	5,7	0,4	0,6	5,2	5,5	1,1	3,5	6,8	1,8	9,0	0,8	1,7	1,5

Установлено, что оптимальная величина шероховатости поверхности (R_z) находится в пределах от 10 до 20 мкм. Во всем остальном диапазоне значений происходит существенное возрастание СКО результатов, что в свою очередь увеличивает случайную составляющую погрешности результатов измерений легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах оптико-эмиссионным методом анализа.

Таблица 3

Результаты определения содержания легирующих элементов и примесей

R_z , мкм	Содержание элементов, % (по массе)													
	Al	B	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	P	Re	Si	Ta	Ti	W
40,2	7,28	0,034	8,91	4,49	0,202	0,048	1,98	0,055	0,0166	3,74	0,039	5,30	0,79	6,30
17,2	7,25	0,034	8,88	4,51	0,186	0,045	1,98	0,055	0,0170	3,71	0,039	5,37	0,80	6,26
14,6	7,15	0,033	8,88	4,50	0,193	0,044	1,97	0,054	0,0169	3,73	0,036	5,34	0,78	6,31
14,7	7,17	0,034	8,82	4,49	0,180	0,041	1,97	0,053	0,0172	3,73	0,036	5,36	0,78	6,32
14,5	7,29	0,034	8,84	4,49	0,175	0,040	1,97	0,053	0,0173	3,77	0,036	5,36	0,78	6,35
6,5	7,42	0,033	8,70	4,44	0,202	0,039	1,94	0,052	0,0169	3,84	0,036	5,27	0,77	6,36
5,8	7,61	0,033	8,81	4,46	0,193	0,039	1,96	0,051	0,0168	3,96	0,035	5,30	0,77	6,43

При $R_z \leq 6,5$ мкм наблюдается некорректное определение содержания массовой доли ряда элементов, что не позволяет использовать данные значения в разрабатываемой методике измерений легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах оптико-эмиссионным методом анализа. Принимая во внимание СКО результатов определения содержания легирующих элементов и примесей, оптимальная используемая величина шероховатости поверхности образцов R_z должна находиться в пределах от 10 до 20 мкм.

Эксперимент по оценке прецизионности при измерении массовой доли элементов в никелевых сплавах с использованием оптико-эмиссионного спектрометра ARL 4460 проводили по схеме, изложенной в ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Правильность определялась по схеме, изложенной в МИ 2336-2002.

На основании проведенных исследований разработана и аттестована (во ФГУП «ВНИИОФИ») методика изменений, метрологические характеристики которой приведены в табл. 4.

**Показатели точности методики
(границы относительной погрешности и предел повторяемости)**

Элемент	Диапазон измеряемых значений, % (по массе)	Показатель точности (границы относительной погрешности) $\pm\delta$, % (при $P=0,95$)
Алюминий	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 15,0 (включ.)	3,5
Кальций	От 0,0001 до 0,001 (включ.)	12
	Св. 0,001 до 0,01 (включ.)	7
Церий	От 0,001 до 0,01 (включ.)	20
	Св. 0,01 до 0,2 (включ.)	10
Кобальт	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 30,0 (включ.)	3
Хром	От 0,001 до 0,01 (включ.)	10
	Св. 0,01 до 40,0 (включ.)	3
Медь	От 0,001 до 0,01 (включ.)	12
	Св. 0,01 до 0,1 (включ.)	7
	Св. 0,1 до 35,0 (включ.)	3
Железо	От 0,01 до 0,1 (включ.)	7
	Св. 0,1 до 50,0 (включ.)	3,5
Лантан	От 0,001 до 0,1 (включ.)	10
Магний	От 0,0001 до 0,001 (включ.)	12
	Св. 0,001 до 0,01 (включ.)	7
Марганец	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 25,0 (включ.)	3
Молибден	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 35,0 (включ.)	3,5
Ниобий	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 10,0 (включ.)	3,5
Никель	От 50,0 до 90,0 (включ.)	3
Фосфор	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 0,1 (включ.)	5
Рений	От 0,02 до 12,0 (включ.)	4
Сера	От 0,001 до 0,01 (включ.)	18
	Св. 0,01 до 0,1 (включ.)	10
Сурьма	От 0,0001 до 0,001 (включ.)	15
	Св. 0,001 до 0,01 (включ.)	10
Кремний	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 0,1 (включ.)	3,5
	Св. 0,1 до 8,0 (включ.)	3
Олово	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 0,1 (включ.)	3,5
Тантал	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 8,0 (включ.)	3,5
Титан	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 6,0 (включ.)	3,5
Ванадий	От 0,005 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 5,0 (включ.)	3
Вольфрам	От 0,001 до 0,01 (включ.)	18
	Св. 0,01 до 6,0 (включ.)	3,5
Иттрий	От 0,001 до 0,01 (включ.)	18
	Св. 0,01 до 1,0 (включ.)	10
Цирконий	От 0,001 до 0,01 (включ.)	7
	Св. 0,01 до 2,0 (включ.)	3

Методика измерений разработана, аттестована и внесена в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Граница относительной по-

грешности определения массовой доли легирующих элементов при их содержании >1% (по массе) не превышает 5% (при $P=0,95$).

Обсуждение и заключения

По результатам определения содержания легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах оптико-эмиссионным методом анализа и исследования влияния шероховатости поверхности на их СКО установлено, что оптимальная используемая величина шероховатости поверхности образцов (R_z) должна находиться в пределах от 10 до 20 мкм.

Разработана методика измерений массовой доли легирующих элементов и примесей в никелевых сплавах оптико-эмиссионным методом анализа, в которой указаны требования к пробоподготовке, условиям проведения измерений и настройке средств измерений.

Методику измерений содержания легирующих элементов и примесей оптико-эмиссионным методом анализа планируется применять при проведении экспресс-анализа изготавливаемых никелевых сплавов и испытаний вновь разрабатываемых стандартных образцов [13–15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений //Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2005. Т. 46. №3. С. 155–167.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью //Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 14–25.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
5. 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. №S. С. 52–57.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
7. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный (на основе γ' -фазы) жаропрочный сплав для лопаток ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 34–40.
9. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Филонова Е.В., Тимофеева О.Б. Структурные исследования и свойства монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ, содержащих повышенное количество фосфора //Труды ВИАМ. 2014. №3. Ст. 02. (viam-works.ru).
10. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
11. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М. Структура современных деформируемых никелевых сплавов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. Т. 6. С. 22–27.
12. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Чабина Е.Б., Тимофеева О.Б. О фазовых и структурных превращениях в жаропрочных ренийсодержащих сплавах монокристаллического строения //Литейное производство. 2008. №7. С. 1–7.

13. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н., Гундобин Н.В., Титов В.И. Разработка стандартных образцов состава сплавов авиационного назначения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 393–398.
14. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н. Опыт разработки стандартных образцов авиационных сплавов //Мир измерений. 2012. №8. С. 31–35.
15. Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф., Проценко О.М., Якимова М.С. Разработка стандартных образцов состава авиационных сплавов //Стандартные образцы. 2013. №4. С. 30–34.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Fiziko-himicheskie i tehnologicheskie osobennosti sozdaniya zharoprochnyh spлавov, sodержashhih renij [Physical and chemical and technological features of creation of the heat resisting alloys containing rhenium] //Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2. Himiya. 2005. T. 46. №3. S. 155–167.
2. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlya aviacionnogo dvigatelestroeniya [Creation of modern heat resisting materials and technologies of their production for aviation engine-building] //Krylya Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Visik E.M. Monokristallicheskiy zharoprochnyj nikelovyj splav novogo pokoleniya s nizkoj plotnostyu [Single-crystal nickel-based superalloy of a new generation with low-density] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). S. 14–25.
4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokoleniya [Nickel foundry heat resisting alloys of new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 36–52.
5. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlya detalej gazoturbinnih dvigatelej [High-temperature heat resisting nickel alloys for details of gas-turbine engines] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 52–57.
6. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Litejnye zharoprochnye nikelovye splavy dlya perspektivnyh aviacionnyh GTD [Foundry heat resisting nickel alloys for perspective aviation GTE] //Технология легких сплавов. 2007. №2. S. 6–16.
7. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlya perspektivnogo dvigatelya OAO «NPO „Saturn”» [New materials for the perspective engine of JSC «NPO „Saturn”»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. S. 6–8.
8. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V. Novyj monokristallicheskiy intermetallidnyj (na osnove γ' -fazy) zharoprochnyj splav dlya lopatok GTD [New single crystal heat-resistant intermetallic γ' -based alloy for GTE blades] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). S. 34–40.
9. Sidorov V.V., Rigin V.E., Filonova E.V., Timofeeva O.B. Strukturnye issledovaniya i svoystva monokristallov spлавov VZhM4-VI i VZhM5-VI [The structure investigations and properties of VGM4-VI and VGM5-VI single crystal alloys with increased phosphorus quantity] // Trudy VIAM. 2014. №3. St. 02. (viam-works.ru).
10. Lomberg B.S., Bakradze M.M., Chabina E.B., Filonova E.V. Vzaimosvjaz struktury i svojstv vysokozharoprochnyh nikelovyh spлавov dlya diskov gazoturbinnih dvigatelej [Interrelation of structure and properties of high-heat resisting nickel alloys for disks of gas-turbine engines] //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. S. 25–30.
11. Chabina E.B., Filonova E.V., Lomberg B.S., Bakradze M.M. Struktura sovremennyh deformiruemih nikelovyh spлавov [Structure of modern deformable nickel alloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2012. T. 6. S. 22–27.
12. Petrushin N.V., Eljutin E.S., Chabina E.B., Timofeeva O.B. O fazovyh i strukturnyh prevrashhenijah v zharoprochnyh renijsoderzhashhih spлавah monokristallicheskogo stroeniya [About phase and structural transformations in heat resisting the renijsoderzhashchikh alloys of a single-crystal structure] //Litejnoe proizvodstvo. 2008. №7. S. 1–7.
13. Letov A.F., Karachevcev F.N., Gundobin N.V., Titov V.I. Razrabotka standartnyh obrazcov sostava spлавov aviacionnogo naznacheniya [Development of standard samples of structure of alloys of aviation appointment] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 393–398.
14. Letov A.F., Karachevcev F.N. Opyt razrabotki standartnyh obrazcov aviacionnyh spлавov [Experience of development of standard samples of aviation alloys] //Мир измерений. 2012. №8. S. 31–35.

15. Karachevcev F.N., Letov A.F., Procenko O.M., Jakimova M.S. Razrabotka standartnyh obrazcov sostava aviacionnyh splavov [Development of standard samples of structure of aviation alloys] //Standartnye obrazcy. 2013. №4. S. 30–34.