



УДК 543.272.51

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ СЕРЫ  
В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ  
И СТАЛЯХ В ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ  
ОТ 0,0001 ДО 0,0009% (по массе)**

Е.А. Механик

П.Г. Мин

Н.В. Гундобин

*кандидат химических наук*

Г.Ю. Растегаева

**Сентябрь 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.

*Е.А. Механик<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>, Н.В. Гундобин<sup>1</sup>, Г.Ю. Растегаева<sup>1</sup>*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ СЕРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ И СТАЛЯХ В ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОТ 0,0001 ДО 0,0009% (по массе)**

*Проведено исследование по определению массовой доли серы в широком интервале концентраций в жаропрочных никелевых сплавах и сталях методом инфракрасной абсорбции оксида серы  $SO_2$ , образующегося при сжигании сплава с соответствующим плавнем (катализатором) в индукционной печи в токе кислорода на газоанализаторе LECO CS-444. В данной работе подобран новый катализатор для наиболее полного извлечения серы из анализируемых сплавов, представляющий собой смесь плавней: 1 г LECOSEL II HP и 0,5 г олова. Выбрана минимальная продолжительность анализа, необходимая для полного извлечения серы. Показана возможность определения содержания серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе).*

**Ключевые слова:** *никелевые сплавы, стали, метод инфракрасно-абсорбционной спектроскопии, методика определения массовой доли серы.*

*E.A. Mekhanik, P.G. Min, N.V. Goundobin, G.Yu. Rastegayeva*

## **DETERMINATION OF SULFUR MASS FRACTION IN HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS AND STEELS WITHIN THE CONCENTRATION RANGE FROM 0.0001 TO 0.0009% wt.**

*Sulfur mass fraction in heat-resistant nickel alloys and steels was determined by using infrared absorption of sulfur dioxide  $SO_2$  formed during combustion of samples with flux (catalyst) by oxygen flow in the induction furnace of gas analyzer LECO CS-444. A new composition of catalyst for full sulfur extraction from the analyzed alloys was chosen in this work. The catalyst consists of 1 g of flux LECOSEL II HP and 0.5 g of tin. The minimum time of the analysis required for full sulfur extraction was chosen. The possibility of sulfur content determination in heat-resistant nickel alloys and steels with in concentrations range from 0.0001 to 0.0009% wt. is shown.*

**Keywords:** *nickel alloys, steels, infrared absorbing spectroscopy, measurement procedure of sulfur mass fraction.*

---

<sup>1</sup> Федеральное 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 применяются в авиационной промышленности для изготовления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, несущих повышенные тепловые и силовые нагрузки [1–7].

Одним из вредных примесных элементов, содержание которого в жаропрочных никелевых сплавах систематически контролируется, является сера [8, 9]. Она образует неметаллические включения в виде сульфидов с компонентами сплавов. Эти включения являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации деталей и ухудшающие, тем самым, механические свойства сплавов, такие как длительная прочность, пластичность, выносливость и др. [10, 11]. Кроме того, сера имеет низкую растворимость в никеле и образует на границах зерен и межфазных границах легкоплавкую эвтектику с никелем с температурой плавления  $\sim 650^\circ\text{C}$ .

В последнее время появился ряд работ [12–16], в которых отмечается отрицательное влияние серы ( $\sim 0,0003\%$  по массе) в жаропрочных сплавах на стойкость защитных покрытий к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии. Установлено, что при содержании в сплаве серы  $>0,0001\%$  (по массе) ухудшается адгезия защитного покрытия к основному металлу за счет диффузии серы в покрытие, вследствие чего снижаются надежность и ресурс работы защитного покрытия на деталях двигателя. В связи с этим глубокое рафинирование сплавов от примеси серы приобретает первостепенное значение.

В ВИАМ разработана технология производства жаропрочных сплавов последнего поколения, которая обеспечивает содержание вредных примесей, в частности серы – не более  $0,001\%$  (по массе) [17–22]. Фактическое содержание серы в сплавах может быть на уровне  $0,0001\%$  (по массе) и ниже. В настоящее время для определения содержания серы на столь низком уровне применяют метод масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом (GDMS). Так, в работе [14] показана возможность определения содержания серы этим методом на уровне  $\leq 0,0001\%$  (по массе). Следует отметить, что данный метод является дорогостоящим.

Более быстрым и дешевым методом для определения содержания серы в настоящее время является метод инфракрасно-абсорбционной спектроскопии, реализованный в анализаторах газообразующих примесей фирмы LECO (CS-444, CS-600), которыми оснащены лаборатории на многих металлургических предприятиях.

В настоящее время разработанных нормативных методик определения содержания серы в жаропрочных никелевых сплавах на уровне  $\leq 0,001\%$  (по массе) в РФ не существует.

Целью данной работы является разработка методики определения массовой доли серы в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе) с использованием метода инфракрасно-абсорбционной спектроскопии.

### **Материалы и методы**

Измерение массовой доли серы в образцах сплавов проводили на газоанализаторе LECO CS-444, оснащенном инфракрасным детектором. Выбраны следующие параметры работы прибора:

Мощность печи (максимальная) . . . . .	100% (отн.);
Продолжительность продувки прибора перед анализом . . . . .	5 с;
Время задержки анализа . . . . .	25 с;
Уровень компаратора . . . . .	2%;
Рабочий газ . . . . .	кислород (высокой чистоты).

В качестве катализаторов, необходимых для полного сжигания анализируемого материала, использовали: смесь вольфрама с оловом в соотношении 1:1 (LECOCEL II HP 502-173), высокочистую железную пудру (HP Iron Powder 501-952), олово и стальной стандартный образец (HP Iron Chip 502-401).

Временной интервал полного выделения серы из образца обрабатывался на стандартном образце фирмы LECO (PART NO. 502-414) с аттестованным содержанием серы 0,0006% (по массе) и никелевом стандартном образце фирмы Bramer (BS800) с аттестованным содержанием серы 0,00036% (по массе). Полное извлечение серы достигается при продолжительности анализа 70 с.

Далее проводили подбор катализаторов (плавней) различного состава, необходимых для полного извлечения серы из анализируемого образца, с использованием стандартных образцов сталей и никелевых сплавов и экспериментального образца жаропрочного никелевого сплава типа ВЖМ4 – рекомендации по определению серы в сплавах представлены в работах [23–26]. Для градуировки газоанализатора использовали стальной стандартный образец фирмы LECO (PART NO. 502-414) с содержанием серы 0,0006% (по массе) [27].

### **Результаты**

Результаты исследований представлены в табл. 1, из данных которой следует, что ни один из плавней и смесей плавней не подходит для определения содержания серы в

экспериментальном сплаве: при использовании 1 и 2 г катализатора LECOCEL II HP сера извлекается не полностью, а при использовании смеси плавней LECOCEL II HP (1 г) и HP Iron Powder (0,5 г) наблюдается завышение содержания серы в стандартном образце.

Для продолжения работы в этом направлении опробованы другие смеси плавней, что дало возможность выбрать оптимальный состав катализатора. Первая композиция – смесь 1 г LECOCEL II HP 502-173 с 0,5 г олова; вторая композиция состоит из 1 г LECOCEL II HP 502-173+0,5 г стандартного образца стали (PART NO. 502-401). Результаты определения представлены в табл. 2 и 3, из данных которых видно, что оптимальным катализатором, обеспечивающим полное выделение серы из аналитической пробы, является смесь 1 г LECOCEL II HP 502-173 с 0,5 г олова.

Таблица 1

**Результаты определения содержания серы в стандартных образцах сталей и никелевых сплавов, а также в экспериментальном жаропрочном никелевом сплаве типа ВЖМ4, с использованием различных катализаторов**

Материал образца	Определяемое содержание серы, % (по массе), в стандартных образцах с использованием плавней состава		
	1 г LECOCEL II HP	2 г LECOCEL II HP	1 г LECOCEL II HP+ +0,5 г HP Iron Powder
Стальной стандартный образец фирмы LECO с содержанием серы, % (по массе):  0,0009±0,00014  0,0006±0,0001  <0,0001	0,00092	0,00088	0,0011
	0,00087	0,00087	0,0010
	0,00089	0,00083	0,00085
	0,00084	0,00084	0,00088
	0,00080	0,00093	0,00076
	0,00054	0,00064	0,00059
	0,00065	0,00056	0,00054
	0,00060	0,00055	0,00060
	0,00062	0,00074	0,00068
	0,00061	0,00062	0,00062
	–	–	0,00028
	–	–	0,00022
	–	–	0,00026
	–	–	0,00018
	–	–	0,00025
Никелевый стандартный образец фирмы Bramer с содержанием серы 0,00036% (по массе)	0,00037	0,00007	0,00028
	0,00029	0,00008	0,00028
	0,00026	*	0,00061
	0,00031	0,00007	0,00014
	0,00027	*	*
Экспериментальный сплав ВЖМ4	**	**	0,00048
	**	**	0,00047
	**	**	0,00027
	**	**	0,00017
	**	**	0,00022

\* Значение аналитического сигнала ниже уровня холостой пробы.

\*\* Проба не стореда, значение аналитического сигнала ниже уровня холостой пробы.

Таблица 2

**Результаты определения содержания серы в стандартных образцах сталей и никелевых сплавов, а также в экспериментальном сплаве типа ВЖМ4, с использованием выбранной композиции плавня**

Катализатор	Определяемое содержание серы, % (по массе)					
	в стальном стандартном образце фирмы LECO с содержанием серы, % (по массе)			в никелевом стандартном образце фирмы Vmet с содержанием серы 0,00036% (по массе)	в экспериментальном сплаве ВЖМ4	в холостой пробе
	0,0009±0,00014	0,0006±0,0001	<0,0001			
Смесь 1 г LECOCEL II HP с 0,5 г олова	0,00090	0,00059	0,00006	0,00025	0,00009	0,00009
	0,00085	0,00059	0,00010	0,00035	0,00006	0,00011
	0,00091	0,00058	0,00008	0,00030	0,00004	0,00010
	0,00088	0,00062	0,00005	0,00026	0,00009	0,00011
	0,00079	0,00061	0,00011	0,00031	0,00012	0,00010

Таблица 3

**Результаты определения содержания серы в экспериментальном сплаве типа ВЖМ4 с использованием выбранной композиции плавня**

Катализатор	Содержание серы, % (по массе), в экспериментальном сплаве ВЖМ4
1 г LECOCEL II HP+0,5 г стандартного образца стали (PART NO. 502-401)	0,000112
	0,000043
	*
	0,000026
	0,000061
	*
	*
	0,000042
	0,000026
	*

\* Значение ниже уровня холостой пробы.

По разработанной методике проанализирован образец никелевого сплава, присланный в лабораторию в рамках международного кругового эксперимента (Kit 8-2 от 2013 г., по программе Airbus. GE. Safran. PTP). Результаты анализа (см. табл. 2) стандартных образцов сталей и никелевых сплавов и образца, присланного в рамках кругового эксперимента (результат определения в ВИАМ: 0,0003% (по массе), аттестованное значение составляет 0,00029% (по массе)), по разработанной методике и их аттестованные значения удовлетворительно согласуются [28].

### Обсуждение и заключения

В результате проведенных исследований показано, что ни один из ранее использованных катализаторов и смесей катализаторов не позволяют корректно и достоверно определять содержание серы в жаропрочных никелевых сплавах в диапазоне концентраций 0,0001–0,0009% (по массе), что объясняется либо неполным извлечением серы из пробы, либо высоким содержанием серы (по сравнению с исследуемой пробой) в катализаторе. В ходе анализа исследуемого материала опробованы различные композиции плавней. После обобщения полученных результатов выбрана оптимальная смесь

катализаторов, позволяющая извлекать из пробы максимальное количество серы. В результате проведенных исследований разработана методика определения массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе) с применением метода инфракрасно-абсорбционной спектроскопии.

#### 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. 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).
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова 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.
4. 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.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением //Металлы. 2006. №5. С. 47–57.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературнонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
7. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
8. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой Ч. I //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.
9. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой Ч. II //Материаловедение. 1997. № 5. С. 14–16.

10. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнелегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 1) //Электromеталлургия. 2014. №3. (в печати).
11. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнелегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 2) //Электromеталлургия. 2014. №4. (в печати).
12. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys //Superalloys. 1992. P. 807–816.
13. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R., Birks N., Pettit F.S., Meier G.H. The control of sulfur content in nickel-base, single crystal superalloys and its effect on cyclic oxidation resistance /In: Superalloys. 1996. P. 71–80.
14. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys /In: Superalloys. 2000. P. 387–392.
15. Ultra low sulfur superalloy casting and method of making: pat. 5922148 US; publ. 13.07.1999.
16. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium: pat. 2415888 EU; publ. 14.10.2010.
17. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Литейное производство. 2011. №10. С. 2–5.
18. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
19. 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.
20. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.Е., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
21. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов //Металлург. 2012. №5. С. 26–30.

22. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Получение Re-Ru содержащего сплава с использованием некондиционных отходов //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 15–17.
23. Lawrenz D. Ultra-low sulfur determination in high purity base metals and high temperature nickel base alloys //Phys. stat. sol. 1998. V. 167. P. 373–381.
24. Liu Y., Shao X., Qu L. Study on analytical method for carbon and sulfur in high nickel corrosion resistant alloy tubing //ICPTT. 2011. P. 1099–1103.
25. ГОСТ 24018.8–91. Сплавы жаропрочные на никелевой основе. Методы определения серы.
26. ASTM E1019–11. Standard test methods for determination of carbon, sulfur, nitrogen, and oxygen in steel, iron, nickel, and cobalt alloys by various combustion and fusion techniques.
27. 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.
28. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов  $\langle 001 \rangle$  высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.

#### 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] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. 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).
3. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of GTE blades with single crystal superalloys and composite structure] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.

4. 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. №5. S. 36–52.
5. Kablov E.N., Petrushin N.V., Bronfin M.B., Alekseev A.A. Osobennosti monokristallicheskih zharoprochnyh nikelevyh splavov, legirovannyh reniem [Features single-crystal high-temperature nickel alloys alloyed with rhenium] //Metally. 2006. №5. S. 47–57.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepλονagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
7. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Napravlenaja kristallizacija zharoprochnyh splavov s povyshennym temperaturnym gradientom [Directional solidification of superalloys with a high temperature gradient] //MiTOM. 2002. №7. S. 20–23.
8. 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] Ch. I //Materialovedenie. 1997. №4. S. 32–39.
9. 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] Ch. II //Materialovedenie. 1997. № 5. S. 14–16.
10. Sidorov V.V., Min P.G. Rafinirovanie slozhnolegirovannogo nikelevogo raspłava ot primesi sery pri plavke v vakuumnoj indukcionnoj pechi (chast' 1) [Refining complex-nickel impurities from molten sulfur melting in a vacuum induction furnace] //Jeletrometallurgija. 2014. №3. S. 18–23.
11. Sidorov V.V., Min P.G. Rafinirovanie slozhnolegirovannogo nikelevogo raspłava ot primesi sery pri plavke v vakuumnoj indukcionnoj pechi (chast' 2) [Refining complex-nickel impurities from molten sulfur melting in a vacuum induction furnace] //Jeletrometallurgija. 2014. №4. (v pečati).
12. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys //Superalloys. 1992. P. 807–816.
13. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R., Birks N., Pettit F.S., Meier G.H. The control of sulfur content in nickel-base, single crystal superalloys and its effect on cyclic oxidation resistance /In: Superalloys. 1996. P. 71–80.

14. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys  
//In: Superalloys. 2000. P. 387–392.
15. Ultra low sulfur superalloy casting and method of making: pat. 5922148 US; publ.  
13.07.1999.
16. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lan-  
thanum and yttrium: pat. 2415888 EU; publ. 14.10.2010.
17. Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Organizacija proizvodstva lityh prutkovykh za-  
gotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [Organiza-  
tion of production of cast bar stock of modern casting nickel-base superalloys]  
//Litejnoe proizvodstvo. 2011. №10. S. 2–5.
18. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye  
tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov novogo  
pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation]  
//Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 97–105.
19. Min P.G., Sidorov V.V. Opyt pererabotki litejnykh othodov splava ZhS32-VI na nauch-  
no-proizvodstvennom komplekse VIAM po izgotovleniju lityh prutkovykh (shihtovykh)  
zagotovok [Experience processing waste foundry alloy ZHS32-VI at the scientific-  
industrial complex for the production of cast VIAM of bar (of charge) blanks]  
//Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 20–25.
20. Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.E., Gorjunov A.V. Formirovanie nanostrukturiro-  
vannogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave pri mikrolegirovanii ego lanta-  
nom [Formation of nanostructured state in casting superalloy with microalloying its lan-  
thanum] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 01 (viam-works.ru).
21. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Kablov D.E. Vysokoeffektivnye tehnologii  
i sovremennoe oborudovanie dlja proizvodstva shihtovykh zagotovok iz litejnykh zharo-  
prochnykh splavov [Enabling technologies and modern equipment for production of  
charge billets casting superalloys] //Metallurg. 2012. №5. S. 26–30.
22. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Min P.G., Kablov D.E. Poluchenie Re–Ru  
soderzhashhego splava s ispol'zovaniem nekondicionnykh othodov [Preparation of Re–  
Ru-containing alloy using rejects] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №3. S. 15–17.
23. Lawrenz D. Ultra-low sulfur determination in high purity base metals and high temper-  
ature nickel base alloys //Phys. stat. sol. 1998. V. 167. P. 373–381.
24. Liu Y., Shao X., Qu L. Study on analytical method for carbon and sulfur in high nickel  
corrosion resistant alloy tubing //ICPTT. 2011. P. 1099–1103.

25. GOST 24018.8–91. Splavy zharoprochnye na nikelevoj osnove. Metody opredelenija sery [High-temperature nickel-based. Methods for determination of sulfur].
26. ASTM E1019–11. Standard test methods for determination of carbon, sulfur, nitrogen, and ox-ygen in steel, iron, nickel, and cobalt alloys by various combustion and fusion techniques.
27. 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  $\text{Ni}_3\text{Al}$  [Low-alloy high-temperature heat-resistant lightweight materials based on the intermetallic  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ] //Metally. 1999. №1. S. 58–65.
28. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov  $\langle 001 \rangle$  vysokorenievogo nikelevogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v usloviyah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Features of the structure and properties of single crystals of high-temperature  $\langle 001 \rangle$  vysokorenievogo nickel superalloy, obtained with high-gradient directional solidification] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.