



УДК 54.063

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

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ**

В.И. ТИТОВ

*кандидат технических наук*

Н.В. ГУНДОБИН

*кандидат химических наук*

Л.В. ПИЛИПЕНКО

**Декабрь 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.

*В.И. Титов<sup>1</sup>, Н.В. Гундобин<sup>1</sup>, Л.В. Пилипенко<sup>1</sup>*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ**

*В работе показана возможность определения примеси кремния в жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС). Кремний в количестве  $>0,4\%$  (по массе) обогащает границы зерен сплава, способствуя выделению на них пленок карбидов  $M_6C$  пластинчатой формы и образованию ТПУ фаз, что приводит к снижению прочностных и пластических свойств. В эксперименте использован родамин С при разработке методики определения содержания кремния в интервале  $0,005-0,1\%$  (по массе) в ЖНС.*

*Экспериментальная часть заключалась в приготовлении стандартного раствора кремния, выборе оптимальных условий реакции образования комплекса «кремнемолибденовая кислота–родамин С»; проверке влияния кислотности среды на процесс солеобразования кремнемолибдат-ионов с родамином С, устойчивости комплекса во времени.*

*В результате выполненной работы разработан метод прямого фотометрирования, с помощью которого можно определять содержание кремния в интервале концентраций  $0,005-0,1\%$  (по массе) в жаропрочных никелевых сплавах.*

**Ключевые слова:** жаропрочные никелевые сплавы, методика, кремний.

*V.I. Titov, N.V. Goundobin, L.V. Pilipenko*

## **DETERMINATION OF SILICON CONTENT IN HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS**

*A possibility of determination of silicon content in heat-resistant nickel alloys (HNA) is surveyed in this work. Silicon in amount  $>0,4\%$  mass. enriches grain boundaries of the alloy promoting precipitation of plate-shaped  $M_6C$  carbide films and TCP phase formation and reduction in strength and plastic properties. Rhodamine C was applied at*

*the development of a method for determination of the silicon content in the range of 0,005–0,1% mass. in HNA.*

*The experimental part was to prepare a standard silicon solution, to choose optimal conditions for reaction of «silicon molybdic acid – rhodamine C» complex formation, to verify an influence of environment acidity on the salt formation process of silicon molybdate ions with rhodamine C, the complex stability in time.*

*As a result of the work, a method of direct photometry was developed by which the silicon content can be determined in heat-resistant nickel alloys within the concentration range of 0.005–0.1 % mass.*

**Keywords:** *heat-resistant nickel alloys, method, silicon.*

---

<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**

Исследованиями жаропрочных никелевых сплавов начали заниматься в 30-е годы прошлого столетия. В этот период развития авиации, связанный с появлением реактивной авиации и газотурбинных двигателей, были нужны принципиально новые авиационные материалы.

Основные задачи авиационной промышленности при создании принципиально новых материалов для летательных аппаратов были сосредоточены на достижении сбалансированного легирования и высокой чистоты по примесным элементам, что необходимо для повышения жаропрочности сплавов, ресурса работы двигателя и агрегатов при более жестких температурных условиях их эксплуатации [1–8].

Сложнолегированные литейные сплавы на никелевой основе являются наиболее жаропрочными. Детали из этих сплавов работоспособны до температур 1050–1100°C, выдерживая высокие статические и динамические нагрузки [9–11].

Жаропрочные никелевые сплавы, применяемые для производства лопаток авиационных двигателей, – наиболее сложные по своему химическому составу из всех существующих конструкционных сплавов. Они имеют гетерофазную структуру с упрочняющей  $\gamma'$ -фазой на основе интерметаллидного соединения  $Ni_3Al$  и легированный никелевый  $\gamma$ -твердый раствор. В никелевой матрице, как правило, до 15–17 легирующих и микролегирующих элементов, тщательно сбалансированных для получения необходи-

мого комплекса свойств материала [12–16]. В этих сплавах обычно содержится 2–12% хрома, 3–12% кобальта, до 8% алюминия и титана, 4–8% вольфрама, 0,6–5% молибдена, 3–12% тантала, а также гафний, ниобий, железо, рений, рутений и примесные элементы (кремний, фосфор, сера, кислород и азот).

В литейных жаропрочных никелевых сплавах кремний является вредной примесью. В сплавы он попадает чаще всего вместе с шихтовыми материалами, особенно в случае использования при плавке отходов.

Кремний увеличивает количество легкоплавких фаз [15] и способствует игольчатому строению карбидов. Отмечают также способность кремния к образованию карбосилицидов, кроме того, он стимулирует образование ТПУ фаз и карбидов  $M_6C$ . Около 60% от общего содержания кремния в сплаве входит в состав  $\gamma'$ -фазы, около 30% – в  $\gamma$ -твердый раствор и 8–10% – в карбиды. Примесь кремния  $>0,4\%$  (по массе) обогащает границы зерен, способствуя выделению на них пленок карбидов  $M_6C$  пластинчатой формы, что приводит к снижению прочностных и пластических свойств.

Как правило кремний – примесный элемент, но может быть и компонентом высокотемпературных Nb–Si композитов, которые могут конкурировать с монокристаллическими никелевым жаропрочными сплавами [17, 18], или в виде карбида входить в состав уплотнительных материалов на основе никеля [19].

Работа посвящена определению малых концентраций кремния в жаропрочных никелевых сплавах.

В научной литературе описано множество фотометрических методов определения кремния, основанных на реакции образования кремнемолибденовой кислоты. Условия проведения реакций и их химическая природа, состав и свойства образующихся гетерополикислот, их применение при анализе различных материалов подробно изложены в монографии [20].

Для определения содержания кремния в сплаве в научно-технической литературе описаны экстракционно-фотометрические методы, но при этом чувствительность определения кремния при использовании экстракции не увеличивается, т. е. значение молярного коэффициента погашения не изменяется. Однако при использовании этого метода возможно избавление от ряда компонентов сплава, создающих помехи при фотометрических измерениях, что все-таки позволяет его использовать. Применяя избирательную экстракцию различными экстрагентами, можно, в частности, отделить кремний от фосфора, мышьяка и селена, гетерополикислоты которых имеют отличные от кремнемолибденовой кислоты коэффициенты распределения. Недостаток аналитиче-

ских методов, основанных на фотометрировании кремнекислоты в водных средах (особенно при фотометрировании восстановленных форм), заключается избавлении от помех, вызванных воздействием избытка молибдена. Применение экстракции позволяет устранить это влияние. Однако экстракционные методы определения содержания кремния очень длительны и трудоемки.

Большие возможности для определения содержания кремния в малом количестве открывает использование основных органических красителей. Очень интересными являются работы по применению родаминовых красителей, в частности родамина Б [21]. Эти методы обладают большей чувствительностью и селективностью. Был исследован ряд родаминовых красителей. Установлено, что наиболее чувствительные комплексы кремнемолибденовая кислота образует с родамином С и бутилродамином.

### **Материалы и методы**

В работе при разработке методики определения содержания кремния в количестве 0,005–0,1% (по массе) в жаропрочных никелевых сплавах был использован родамин С. Для проведения исследований также использовали:

- стандартный раствор кремния;
- кремнемолибденовую кислоту;
- азотную кислоту;
- серную кислоту;
- соляную кислоту.

### **Результаты**

#### ***Проведение анализа***

Навеску сплава ЖНС (1 г) растворяли в смеси соляной и азотной кислот и воды в соотношении 3:1:8 при умеренном нагреве и поддержании постоянного объема раствора 50 мл. После растворения сплава раствор переливали в мерную колбу емкостью 100 мл, добавляли воды до необходимого объема и перемешивали. К аликвотной части раствора (1 мл) добавляли воды до 20 мл. Необходимую кислотность среды (pH=1,5) получали путем введения раствора аммиака и определяли с помощью универсальной индикаторной бумаги. Далее добавляли 10 мл 1%-ного раствора молибдата аммония и оставляли на 30 мин. Затем добавляли 10 мл 5 н. раствора азотной кислоты, 5 мл 10 %-ного раствора лимонной кислоты, 1 мл 0,1%-ного раствора родамида С, добавляли воды до необходимого объема и измеряли оптическую плотность растворов. В качестве

раствора для сравнения использовали вторую аликвотную часть раствора, содержащую все реактивы, за исключением молибдата аммония. Расчет содержания кремния в сплаве проводили по градуировочному графику или стандартному образцу сплава с известным содержанием кремния.

### ***Приготовление стандартного раствора кремния***

Стандартный раствор кремния, содержащий 0,1 мг кремния в 1 мл раствора, готовили путем растворения навески 1,0143 г силиката натрия в 100 мл воды. Титр раствора устанавливали весовым солянокислым методом. Раствор хранили в полиэтиленовой посуде не более 3–4 мес во избежание полимеризации мономерной формы кремневой кислоты.

### ***Выбор оптимальных условий реакции образования комплекса***

#### ***«кремнемолибденовая кислота–родамин С»***

В кислой среде (0,5 н. раствора по азотной кислоте) реагент образует комплексное соединение с кремнемолибденовой кислотой. Тройной комплекс имеет ярко-сиреневую окраску. Для выбора оптимальных условий реакции образования комплекса кремнемолибденовой кислоты с родамином С изучали влияние различных факторов: кислотности среды (при образовании гетерополикислоты с родамином С и при образовании тройного комплекса с родамином С), концентрации молибдат-ионов и красителя, устойчивости комплекса во времени.

Исследовано влияние кислотности среды на процесс солеобразования кремнемолибдат-ионов с родамином С. Установлено, что оптическая плотность комплекса остается постоянной при кислотности среды от 0,3 до 2 н. раствора по азотной кислоте. Определение содержания кремния проводили в азотнокислой среде при оптимальной ее концентрации 0,5–0,7 н.

Для определения устойчивости комплекса проведено измерение оптической плотности растворов во времени. Выявлено, что окраска комплекса развивается сразу же после добавления красителя и остается постоянной в течение 30 мин. Повысить устойчивость растворов во времени удалось благодаря введению поливинилового спирта в качестве защитного коллоида.

### ***Построение градуировочного графика***

Во фторопластовый стакан помещали стандартный раствор кремния (0,2–2 мкг) и добавляли 20 мл 0,05 н. раствора азотной кислоты, 10 мл 1%-ного раствора молибдата аммония, выдерживали 30 мин. Затем добавляли 10 мл 5 н. раствора азотной кислоты, переводили в мерную колбу на 100 мл, добавляли 1 мл 1%-ного раствора родамина С, доводили до метки водой и тщательно перемешивали. Оптическую плотность растворов измеряли на фотоколориметре в кювете с толщиной поглощения 30 мм. Вычитая из полученных значений оптических плотностей значение холостого опыта на реактивы, строили график зависимости оптической плотности от концентрации кремния.

### ***Влияние кислот на реакцию кремнемолибденовой кислоты с родамином С***

Изучали влияние соляной, азотной и серной кислот на реакцию образования тройного комплекса. Установлено, что присутствие этих кислот не влияет на величину оптической плотности тройного комплекса.

Проверено также влияние органических кислот: лимонной, винной и щавелевой. При введении до 10 мл 10%-ного раствора этих кислот в фотометрируемый объем оптическая плотность растворов снижается весьма незначительно и при введении этих кислот одновременно в стандартные и исследуемые растворы в одинаковом количестве это влияние не сказывается на результатах анализа.

### ***Растворение никелевых сплавов***

При переводе кремния в раствор очень важно соблюдать условия растворения сплава – определенную кислотность и температуру – для предотвращения процесса полимеризации кремневой кислоты. Сплавы на основе никеля растворяются в смеси разбавленных азотной и соляной кислот в соотношении  $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:3:8$ . В присутствии вольфрама растворение нужно вести добавляя по каплям перекись водорода. Растворение сплавов проводят при небольшом нагревании (водяная баня), не допуская выпаривания растворов и поддерживая их постоянный объем путем добавления дистиллированной воды.

### **Обсуждение и заключения**

В работе для определения содержания малых концентраций (0,005–0,1% (по массе)) кремния в жаропрочных никелевых сплавах использовали реагент родамин С. Исследованы оптимальные условия проведения реакций: образование кремнемолибдено-

вой кислоты проводили при  $pH=1,5$ . Тройной комплекс образуется в среде 0,5–0,7 н. раствора азотной кислоты в присутствии избытка роданина С. При определении кремния компоненты никелевых сплавов не создают помех. Негативное влияние фосфора и мышьяка устраняли при помощи лимонной кислоты.

Высокая избирательность и чувствительность реакции позволили разработать метод прямого фотометрирования для определения содержания кремния в ЖНС в интервале концентраций 0,005–0,1% (по массе).

Выбраны оптимальные условия проведения реакции образования тройного комплексного соединения кремнемолибденовой кислоты с роданином С (влияние кислотности среды, устойчивость комплекса во времени и др.).

Исследовано влияние компонентов сплава и анионов кислот на реакцию кремнемолибдата с роданином С.

Разработана методика прямого фотометрического определения содержания кремния в интервале концентраций от 0,005 до 0,1% (по массе) в жаропрочных никелевых сплавах.

#### 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., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. и др. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.
3. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В. и др. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
5. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.

6. Морозова Г.И., Тимофеева О.Б., Петрушин Н.В. Особенности структуры и фазового состава высокопрочного жаропрочного сплава //МиТОМ. 2009. №2 (644). С. 10–16.
7. Kablov E.N., Petrushin N.V., Nazarkin R.M. Designing of intermetallic Ni3Al-based superalloy /In: 9-th liege conf. Materials for advanced power engineering. 2010. P. 646–651.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных сплавов /В сб. трудов научн.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург: Наука Сервис. 2011. Т. 1. С. 31–38.
9. Авиация. Энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия. 1994. С. 201.
10. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия. 2-е изд. М.: Наука. 2006. 632 с.
11. 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.
12. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 15–19.
13. 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.
14. Оспенникова О.Г. Температурный взлет длиной в полвека //Наука и жизнь. 2012. №7. С. 26–28.
15. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием //Металлы. 1990. №1. С. 94–99.
16. 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.
17. Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам //Двигатель. 2010. №5(71). С. 36–37.

18. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 38–52.
19. Титов В.И., Гундобин Н.В., Пилипенко Л.В., Дворецков Р.М. Определение карбида кремния и нитрида алюминия в уплотнительном материале на основе никеля //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 03 (viam-works.ru).
20. Мышляева Л.В., Краснощеков В.В. Аналитическая химия кремния. М.: Наука. 1972. 212 с.
21. Николаева Д.Н. Соединения молибдованадофосфорных гетерополикислот с основными красителями в фотометрических определениях фосфора //Talanta. 1973. V. 20. №8. P. 749–754.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E. i dr. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov novogo pokolenija [Modern technology of bar stock from the casting of superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
3. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V. i dr. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine JSC "NPO" Saturn "] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteploagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Э. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. С. 13–19.
5. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svoystv monokristallov <001> vysokoteplovogo nikelievogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Features of the structure and properties of single crystals <001> of high-temperature high-rhenium superalloy, obtained under high-gradient directional solidification] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.

6. Morozova G.I., Timofeeva O.B., Petrushin N.V. Osobennosti struktury i fazovogo sostava vysokorenievogo zharoprochnogo splava [Features of the structure and phase composition high-rhenium superalloy] //MiTOM. 2009. №2 (644). S. 10–16.
7. Kablov E.N., Petrushin N.V., Nazarkin R.M. Designing of intermetallic Ni3Al-based superalloy /In: 9-th liege conf. Materials for advanced power engineering. 2010. P. 646–651.
8. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovykh (shihtovykh) zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh splavov [Production of cast semifinished (charge) pieces of modern foundry alloys highly heat] /V sb. trudov nauchn.-tehn. konf. «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovanij i NIOKR». Ekaterinburg: Nauka Servis. 2011. T. 1. S. 31–38.
9. Aviacija. Jenciklopedija [Aviation. Encyclopedia]. M.: Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija. 1994. S. 201.
10. Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinykh dvigatelej: splavy, tehnologija, pokrytija [Alloy blades of gas turbine engines: alloys, technology, coverage]. 2-e izd. M.: Nauka. 2006. 632 s.
11. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozicijnoj strukturoj [The development process of directional solidification of the gas turbine engine blades superalloys with a single-crystal structure and composition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
12. Petrushin N.V., Svetlov I.L., Ospennikova O.G. Litejnye zharoprochnye nikellevye splavy [Casting nickel superalloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2012. №5. S. 15–19.
13. 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.
14. Ospennikova O.G. Temperaturnyj vzlet dlinoj v polveka [The temperature rise in the long half-century] //Nauka i zhizn'. 2012. №7. S. 26–28.
15. Sidorov V.V., Morozova G.I., Petrushin N.V., Kuleshova E.A. Fazovyj sostav i termostabil'nost' litejnogo zharoprochnogo nikellevogo splava s kremniem [Phase composition and thermal stability of the casting heat-resistant nickel alloy with silicon] //Metally. 1990. №1. S. 94–99.

16. Kablov E.N., Petrushin N.V., Bronfin M.B., Alekseev A.A. Osobennosti monokristallicheskikh zharoprochnykh nikelovykh splavov, legirovannykh reniem [Features single-crystal high-temperature nickel alloys doped with rhenium] //Metally. 2006. №5. S. 47–57.
17. Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Vysokotemperaturnye Nb–Si kompozity – zamena monokristallicheskim nikelovym zharoprochnym splavam [High-Nb-Si composites - replacing single crystal nickel superalloy] //Dvigatel'. 2010. №5(71). S. 36–37.
18. Kablov E.N., Petrushin N.V., Eljutin E.S. Monokristallicheskie zharoprochnye splavy dlja gazoturbinykh dvigatelej [Single crystal superalloys for gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 38–52.
19. Titov V.I., Gundobin N.V., Pilipenko L.V., Dvoreckov R.M. Opredelenie karbida kremnija i nitrida aljuminija v uplotnitel'nom materiale na osnove nikelja [Determination of silicon carbide and aluminum nitride in the sealing material based on nickel] //Trudy VIAM. 2014. №5. St. 03 (viam-works.ru).
20. Myshljaeva L.V., Krasnoshhekov V.V. Analiticheskaja himija kremnija [Analytical chemistry of silicon]. M.: Nauka. 1972. 212 s.
21. Nikolaeva D.N. Soedinenija molibdovanadofosfornyh geteropolikislot s osnovnymi krasiteljami v fotometricheskikh opredelenijah fosfora [Heteropoly compounds molybdenum-vanadium-phosphoric acids with basic dyes in photometric determination of phosphorus] //Talanta. 1973. V. 20. №8. P. 749–754.