



УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-1-1

**РАФИНИРОВАНИЕ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНОГО
НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС32-ВИ ОТ ПРИМЕСИ
КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМНОЙ
ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ**

П.Г. Мин

В.В. Сидоров

доктор технических наук

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.

П.Г. Мин¹, В.В. Сидоров¹

РАФИНИРОВАНИЕ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС32-ВИ ОТ ПРИМЕСИ КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ

Рассмотрена возможность снижения содержания кремния при переработке отходов из сплава ЖС32-ВИ за счет совместного введения щелочноземельных элементов (ЩЗЭ) и редкоземельных элементов (РЗЭ) с последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр с активированной рабочей поверхностью из СаО. Установлено, что на полноту удаления из расплава неметаллических включений (НВ), содержащих кремний, влияет скорость фильтрации. Показана эффективность применения иттрия для рафинирования никелевого расплава от примеси кремния.

Ключевые слова: *кремний, рафинирование, жаропрочный сплав, вакуумная индукционная печь, плавка, редкоземельные элементы, щелочноземельные элементы, фильтрация.*

P.G. Min, V.V. Sidorov

REFINING OF SCRAPS OF Ni-BASE SUPERALLOY ZhS32-VI TO ELIMINATE SILICON IMPURITY UNDER CONDITIONS OF VACUUM INDUCTION MELTING

Possibility of reduction of the silicon content in ZhS32-VI alloy by combined introduction of AEE and REE additions followed by filtration of the melt through the ceramic foam filter with activated working surface from CaO. It was established that filtration rate influences the completeness of removal of nonmetallic inclusions from the melt. The effective use of yttrium for Ni-base melt refining from silicon impurity was demonstrated.

Keywords: *silicon, refining, superalloy, vacuum induction furnace, melting, rare-earth elements, alkaline earth elements, filtration.*

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 ВИАМ на переработку поступают отходы жаропрочных никелевых сплавов, образующиеся на моторостроительных и ремонтных заводах. Эти отходы загрязнены вредными примесями, в том числе кремнием [1–10]. Внешний вид поступающих на переработку отходов представлен на рис. 1.

В ВИАМ разработана ресурсосберегающая технология выплавки литейных жаропрочных сплавов, в том числе сплава ЖС32-ВИ, в вакуумных индукционных печах с применением до 100% всех видов отходов [11–15]. Технология обеспечивает стабильный химический состав сплавов, низкое содержание примесей (кислорода, азота, серы, цветных металлов), а также уровень механических свойств в соответствии с ТУ. Однако при переработке отходов из сплава ЖС32-ВИ с повышенным содержанием кремния данная технология не обеспечивает его снижения до значений, соответствующих ТУ (не более 0,2% (по массе)). Это связано с тем, что к настоящему времени не разработаны способы рафинирования отходов жаропрочных никелевых сплавов от примеси кремния. В связи с этим, при выплавке сплава ЖС32-ВИ с применением отходов, содержащих $>0,2\%$ кремния, необходимо использовать свежие шихтовые материалы (никель, кобальт, рений, тантал и др.) для разбавления сплава по содержанию кремния с целью получения годного металла.



Рисунок 1. Внешний вид отходов из жаропрочных никелевых сплавов, поступающих на переработку

Важно отметить, что сплав ЖС32-ВИ содержит в своем составе дорогостоящие и дефицитные металлы, такие как рений, тантал, ниобий, молибден, вольфрам и другие. Использование при плавке 100% отходов из сплава ЖС32-ВИ позволяет создать замкнутый цикл возврата в производство этих дорогостоящих и дефицитных элементов, обеспечить их экономию до 15–25% и снизить стоимость сплава на 20–30%.

Работа посвящена изучению возможности понижения содержания кремния, поступающего с отходами из сплава ЖС32-ВИ, при плавке в вакуумных индукционных печах.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран серийный литейный ренийсодержащий жаропрочный никелевый сплав ЖС32-ВИ, который в настоящее время широко применяется в авиационной промышленности для изготовления рабочих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) [16–20].



Рисунок 2. Внешний вид вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002

Сплав выплавляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с массой тигля 20 кг. Отбор проб жидкого металла для химического анализа примесных элементов в процессе плавки осуществляли путем погружения в расплав стальной пробницы многоразового использования. Пробницы перед погружением сушили в течение 1 ч при температуре 200–300°C. Разливку металла проводили в стальные трубы $\varnothing 90$ мм. Внешний вид печи представлен на рис. 2. Из полученных литых заготовок после механической

обработки изготовлены образцы для определения содержания кремния. Анализ содержания кремния проводили атомно-абсорбционным методом на спектрометре Varian 240FS.*

Исследования проводили на шлифах, вырезанных из поперечных темплетов слитков $\varnothing 90$ мм. Шлифы изготавливали на оборудовании фирмы Struers.

Съемку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC335 (3 мегапикселя). Подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку проводили при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3x.

Количественный анализ объемной доли неметаллических включений (НВ) и определение их максимального размера**, а также плотности включений на 1 мм^2 проводили на оптическом комплексе фирмы Leica на 10 полях зрения для каждого образца при увеличении $\times 200$. Каждый шлиф просматривали при увеличении $\times 100$ – 200 по всей площади шлифа. Затем фотографировали и обрабатывали все поля зрения с НВ, а из них отбирали 10 полей с наибольшей объемной долей НВ.

Методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) определяли состав неметаллических включений с кремнием.

Методом качественного и количественного МРСА на аппарате Суперпроб-733 (JСМА-733, фирма Jeol, Япония) исследовали локальный химический состав образцов.***

Результаты

Кремний в жаропрочных никелевых сплавах является вредной примесью, которая снижает их свойства, поэтому его содержание ограничено: в сплавах с равноосной структурой – до 0,25% (сплавы ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и др.) и с направленной и монокристаллической структурой – до 0,2% (сплавы ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС26У-ВИ и др.) [21].

Кремний попадает в никелевые жаропрочные сплавы из шихтовых материалов при плавке и из керамики – при отливке лопаток. Основным источником поступления кремния в сплавы с равноосной структурой – это металлические шихтовые материалы. Поскольку кристаллизация расплава в равноосных отливках протекает быстро, взаимодействия расплава с керамическим блоком практически не происходит.

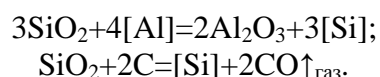
*Анализ проводила Т.Н. Загвоздкина.

**Исследование проводила Е.А. Давыдова.

***Исследование проводила И.В. Исходжанова.

Для сплавов с направленной и монокристаллической структурой источниками поступления кремния в сплавы являются, в основном, керамические материалы, применяемые при отливке лопаток (керамическая форма, керамический стержень и плавильный тигель).

При длительном взаимодействии расплава с керамикой формы и стержня, содержащих несвязанный SiO_2 , что имеет место при отливке лопаток с направленной или монокристаллической структурой, алюминий расплава как наиболее активный компонент сплава, а также углерод взаимодействуют со свободным SiO_2 и восстанавливают кремний в расплаве по реакциям:



В условиях ВИАМ проведены исследования по удалению кремния из никелевого расплава, выплавленного с применением 100% отходов из сплава ЖС32-ВИ с повышенным содержанием кремния. Для этого провели серию плавов жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с емкостью керамического тигля 20 кг. Для рафинирования металла от примеси кремния в расплав вводили редкоземельные элементы (РЗЭ) – иттрий, скандий и неодим, щелочноземельные элементы (ЩЗЭ) – кальций, магний и барий. Рафинирование расплава осуществляли парами ЩЗЭ, которые имеют высокую упругость пара (1,2 атм – Ca; 16 атм – Mg при 1600°C), но низкие температуры плавления (842°C – Ca; 649°C – Mg) и кипения (1495°C – Ca; 1090°C – Mg). Испаряясь при контакте с жидким металлом (температура расплава 1530–1600°C), они провоцировали «кипение» расплава под вакуумом и тем самым обеспечивали его рафинирование. Затем в рафинированный расплав вводили РЗЭ и разливали его через пенокерамический фильтр с активированной рабочей поверхностью в слиток.*

Поскольку температура плавления соединений кремния с РЗЭ заметно выше температуры расплава (1840°C – для YSi, 2100°C – для ScSi, 1757°C – для NdSi), а отрицательная величина энергии Гиббса этих соединений выше, чем у оксида кремния, то для нейтрализации и удаления кремния из расплава целесообразно связать его в тугоплавкое соединение с РЗЭ и затем отсорбировать на пенокерамическом тигле при разливке расплава. Содержание кремния в рафинированном металле приведено в табл. 1.

*Фильтры изготовлены Ю.И. Фоломейкиным.

**Содержание примесей кремния и неметаллических включений в сплаве ЖС32-ВИ,
выплавленном с применением 100% отходов**

Технология плавки	Содержание примеси Si, % (по массе)	Неметаллические включения, % (объемн.)	Количество включений** на поле зрения, шт/мм ²
Без добавок	0,287	0,1626	373/164–754
ВТР*+Mg+Y	0,250	0,0795	102/63–130
ВТР+Mg+Sc	0,258	–	–
Ca+ВТР+Mg+Y	0,263	–	–
Ca+Mg+Y	0,244	0,0119	42/14–84
Mg+Mg+Y	0,243	0,0749	183/20–707
Mg+Mg+Y	0,254	0,0248	43/6–140
Ca+Mg+Y	0,261	0,0837	82/11–123
ВТР+Ba+Mg+Y	0,272	–	–

* ВТР – высокотемпературное рафинирование расплава.

** В числителе – среднее значение, в знаменателе – минимальное и максимальное.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный способ удаления кремния позволяет максимально снизить его содержание в сплаве (см. табл. 1) – на 0,044% (с 0,287 до 0,243%).

Установлено, что при плавке совместное введение кальция или магния и иттрия с последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр с активированной рабочей поверхностью из оксида кальция является наиболее эффективным. Поскольку кальций и магний являются активными раскислителями расплава, то при последующем введении РЗЭ они практически не окисляются и целиком используются для связывания кремния и других примесей.

В результате, при введении иттрия в сплав, загрязненный кремнием, образуются НВ – силициды и оксисилициды иттрия, содержащие по данным МРСА: 4–12% Si, 14–18% Y, 40–60% Ni, остальное (в небольшом количестве) – Al, Cr, Co, и O₂. Содержание неметаллических включений (НВ) в металле после фильтрации снижается почти на порядок – с 0,16 до 0,01–0,02% (объемн.), уменьшается размер включений и их количество (см. табл. 1). Необходимо отметить, что после фильтрации одновременно снижается в сплаве остаточное содержание иттрия, что подтверждает факт сорбирования НВ с иттрием на поверхности пенокерамического фильтра при разливке.

Поскольку расплав, содержащий НВ, при разливке проходит через пенокерамический фильтр и контактирует с керамикой, то для более полного удаления включений путем сорбирования желательнее снизить скорость фильтрации. Для этого в разливочной воронке был уменьшен диаметр сливного отверстия, что позволило снизить скорость фильтрации с 0,6 до 0,47 кг/с. Влияние скорости фильтрации и технологии выплавки на содержание примеси Si показано в табл. 2.

**Содержание примеси кремния в сплаве ЖС32-ВИ,
выплавленного с применением 100% отходов**

Условный номер плавки	Технология плавки	Скорость фильтрации, кг/с	Содержание примеси Si, % (по массе)
1	Без добавок	–	0,308
2	Ca+Mg+Y	0,6	0,271
3	Ca+Mg+Y	0,47	0,251
4	Ca+Mg+Nd	0,6	0,277

Благодаря снижению скорости фильтрации при разливке расплава через пенокерамический фильтр удалось наиболее полно удалить из металла кремний (см. табл. 2). При пониженной скорости фильтрации (0,47 кг/с) содержание кремния в металле уменьшилось с 0,308 до 0,251% (на 0,057%), тогда как при стандартной скорости фильтрации (0,6 кг/с) – только до 0,271% (на 0,037%).

По результатам анализа данных табл. 1 и 2 видно, что из исследованных РЗЭ (Y, Sc, Nd) наиболее эффективно для удаления кремния из расплава применение иттрия.

Обсуждение и заключения

Для снижения содержания кремния в сплаве ЖС32-ВИ следует использовать при плавке совместное введение ЦЗЭ и РЗЭ с последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр с активированной рабочей поверхностью из оксида кальция.

Установлено, что со снижением скорости фильтрации возрастает эффективность удаления из расплава НВ, содержащих кремний. Из исследованных РЗЭ (Y, Sc, Nd) наиболее эффективно для удаления кремния из расплава применение иттрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. №5. С. 97–105.
3. 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.
4. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и разработка эффектив-

- ных способов его рафинирования //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 32–36.
5. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2013. №8. С. 3–7.
 6. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и его влияние на эксплуатационные свойства //МиТОМ. 2014. №1. С. 8–12.
 7. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium: pat. 2415888 EU; publ. 14.10.2010.
 8. Zhuanggi HU, Hongwei SONG, Shouren GUO, Wenru SUN and Dezhong LU. Effects of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. Suppl. P. 73–76.
 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 повышенные количества фосфора //Труды ВИАМ. 2014. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
 10. Способ получения изделия из жаропрочного никелевого сплава: пат. 2215059 Рос. Федерация; опубл. 26.12.2001.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов /В сб. трудов науч.-технич. конф., посвященной 310-летию

- уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения. Т. 1. Екатеринбург: «Наука Сервис». 2011. С. 31–38.
16. 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.
17. 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).
18. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
19. 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.
20. 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.
21. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Тимофеева О.Б., Мин П.Г. Влияние кремния и фосфора на жаропрочные свойства и структурно-фазовые превращения в монокристаллах их высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 32–38.

REFERENCES LIST

1. Min P.G., Sidorov V.V. Opyt pererabotki litejnyh othodov splava ZhS32-VI na nauchno-proizvodstvennom komplekse VIAM po izgotovleniju lityh prutkovykh (shihtovykh) zagotovok [Experience in processing of waste foundry alloy ZHS32-VI at the scientific-industrial complex for the production of cast VIAM of bar (charge) blanks] //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 20–25.
2. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh spлавov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.

3. Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Organizacija proizvodstva lityh prutkovykh zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [Organization of production of cast bar stock of modern casting nickel-base superalloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №10. S. 2–5.
4. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Vlijanie primesi azota na strukturu monokristallov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS30-VI i razrabotka jeffektivnykh sposobov ego rafinirovaniya [Influence of nitrogen impurities on the structure of single-crystal nickel superalloys ZhS30-VI and develop effective ways of refining it] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 32–36.
5. Kablov D.E., Chabina E.B., Sidorov V.V., Min P.G. Issledovanie vlijaniya azota na strukturu i svojstva monokristallov iz litejnogo zharoprochnogo splava ZhS30-VI [Investigation of the influence of nitrogen on the structure and properties of single crystals of cast superalloy ZhS30-VI] //MiTOM. 2013. №8. S. 3–7.
6. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Zakonomernosti povedeniya azota pri poluchenii monokristallov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS30-VI i ego vlijanie na jekspluatacionnye svojstva [Of the behavior of nitrogen in the preparation of single crystals of heat-resistant nickel alloy ZhS30-VI and its impact on the performance of the] //MiTOM. 2014. №1. S. 8–12.
7. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium: pat. 2415888 EU; publ. 14.10.2010.
8. Zhuanggi HU, Hongwei SONG, Shouren GUO, Wenru SUN and Dezhong LU. Effects of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. Suppl. P. 73–76.
9. Sidorov V.V., Rigin V.E., Filonova E.V., Timofeeva O.B. Strukturnye issledovaniya i svojstva monokristallov splavov VZhM4-VI i VZhM5-VI, sodержashhih povyshennye kolichestva fosfora [Structural studies of the properties of single crystals and alloys VZhM4-VI-VI and VZhM5 containing elevated levels of phosphorus] //Trudy VIAM. 2014. №3. St. 02 (viam-works.ru).
10. Sposob poluchenija izdelija iz zharoprochnogo nikelovogo splava [A method of manufacturing a heat-resistant nickel alloy]: pat. 2215059 Ros. Federacija; opubl. 26.12.2001.
11. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Kablov D.E. Vysokojeffektivnye tehnologii i sovremennoe oborudovanie dlja proizvodstva shihtovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov [Enabling technologies and modern equipment for the production of charge billets casting of superalloys] //Metallurg. 2012. №5. S. 26–30.

12. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Min P.G., Kablov D.E. Poluchenie Re–Ru-soderzhashhego splava s ispol'zovaniem nekondicionnyh othodov [Preparation of Re–Ru-containing alloy using unconditioned waste] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №3. S. 15–17.
13. Kablov E.N., Petrushin N.V., Bronfin M.B., Alekseev A.A. Osobennosti monokristallicheskih zharoprochnyh nikelovyh splavov, legirovannyh reniem [Features single-crystal high-temperature nickel alloys, alloyed with rhenium] //Metally. 2006. №5. S. 47–57.
14. Kablov E.N., Petrushin N.V., Vasilenok L.B., Morozova G.I. Renij v zharoprochnyh nikelovyh splavah dlja lopatok gazovyh turbin (prodolzhenie) [Measurements in high-temperature nickel alloys for gas turbine blades (continued)] //Materialovedenie. 2000. №3. S. 38–43.
15. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovykh (shihtovykh) zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnyh nikelovyh splavov [Production of cast semifinished (of charge) blanks of the modern casting nickel-base superalloys] /V sb. trudov nauch.-tehnic. konf., posvjashhennoj 310-letiju ural'skoj metallurgii i sozdaniju tehniko-vnedrencheskogo centra metallurgii i tjazhelogo mashinostroenija. T. 1. Ekaterinburg: «Nauka Servis». 2011. S. 31–38.
16. 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 gas turbine engine blades with a single-crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
17. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelyenty – materialy sovremennykh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
18. Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.V., Gorjunov A.V. Formirovanie nanostrukturirovannogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave pri mikrolegirovanii ego lantanom [Formation of nanostructured state in casting superalloy with microalloying its lanthanum] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 01 (viam-works.ru).
19. 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.

20. 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.
21. Sidorov V.V., Rigin V.E., Timofeeva O.B., Min P.G. Vlijanie kremnija i fosfora na zharoprochnye svojstva i strukturno-fazovye prevrashhenija v monokristallah ih vysokozharoprochnogo splava VZhM4-VI [Effect of silicon and phosphorus on the heat-resistant properties and structural phase transitions in single crystals of a highly heat resistant alloy VZhM4-VI] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 32–38.