

УДК 669.018.44: 669.245

Д.Е. Каблов¹, В.Н. Симонов², М.С. Алексеева¹**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ФИЛЬТРА
И ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ
ПОРИСТОЙ КЕРАМИКОЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Al_2O_3**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-47-53

Изучена особенность фильтрации примесей при прохождении расплава для получения ультрачистых по примесям сплавов на никелевой основе. Исследовано строение пенокерамического фильтра из оксида алюминия (Al_2O_3) в исходном состоянии и после прохождения расплава ЖС36-ВИ с повышенным содержанием серы и фосфора. Проведены расчеты фазового состояния фильтра после вакуумного отжига. Определены геометрические параметры пенокерамического фильтра: диаметр пор и толщина перегородки между порами в исходном состоянии. Методами электронной микроскопии и микрорентгеноспектального анализа установлены последовательность появления и места на внутренних каналах, где наблюдается адгезия частиц, содержащих серу при рафинировании лантаном. Установлено, что фосфиды лантана не адсорбируются на стенках фильтра.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, сера, фосфор, оксид алюминия, пенокерамический фильтр, примесь, фильтрация, электронная микроскопия.

Specialty of the melt filtering from impurities for obtaining ultrapure nickel-based alloys is studied. The structure of the foam-ceramic filter from aluminum oxides (Al_2O_3) in initial condition and after the ZhS36-VI melt passing through with the raised sulfur content and phosphorus is investigated. Calculations of phase state of the filter after vacuum annealing are carried out. Geometrical parameters of the foam-ceramic filter are determined: diameter of pores and web thickness between the pores in initial condition. Sequence of appearance and place where adhesion of the particles containing sulfur is observed on internal channels during refinement by lanthanum are determined by methods of electron microscopy and micro x-ray spectral analysis. It is established that lanthanum phosphides are not adsorbed on the filter walls.

Keywords: heat resistant nickel alloy, sulfur, phosphorus, aluminum oxide, foam ceramic filter, impurity, filtering, electron microscopy.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Необходимость дальнейшего повышения температуры газа на входе в турбину высокого давления до 2000–2200 К (что на 300–400 К выше температуры газа на современных газотурбинных двигателях 4-го поколения) потребовала разработки нового поколения жаропрочных сплавов с заданной монокристаллической структурой, что позволит значительно улучшить тактико-технические характеристики двигателей, их надежность и ресурс.

В настоящее время во всех авиационных КБ применение рабочих лопаток с монокристаллической структурой в перспективных ГТД является одним из эффективных способов повысить температуру газа перед турбиной в двигателе.

При решении поставленных задач и совершенствовании технологии получения лопаток из жа-

ропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой немаловажным фактором являются изучение строения фильтра и особенностей удаления примесей из жидкого металла, а также нейтрализация остаточных примесей в твердом металле. В связи с этим в рамках реализации стратегического комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» [1] выполнена работа по исследованию строения фильтра и особенностей фильтрации примесей пористой керамикой из оксида алюминия (Al_2O_3).

В настоящее время в современных авиационных двигателях широко используются лопатки из жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой. В отличие от традиционных литейных жаропрочных сплавов с равноосной и направленной структурой, к монокристалличе-

ским сплавам предъявляются повышенные требования по обеспечению ультравысокой чистоты по вредным примесям, в частности – по сере и фосфору [2–4]. Это гарантирует бездефектный рост монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией, получение высокого уровня свойств, отсутствие ТПУ фаз, стабильность их микроструктуры при длительной эксплуатации лопаток в двигателе.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что получить высококачественные лопатки с бездефектной монокристаллической структурой возможно только при использовании для их отливки сплавов с ультранизким содержанием в них вредных примесей, в частности серы и фосфора. Кроме того, сера и фосфор имеют низкую растворимость в никеле и образуют легкоплавкие эвтектики с температурой плавления: 650°C – NiS, 850°C – NiP.

В представленном анализе следующих работ [4–11] отмечается, что при выплавке сплавов в вакуумных индукционных печах из шихтовых материалов в сплав может переходить до 0,009% S [4]. В отличие от плавки на воздухе, где сера удаляется из металла благодаря применению шлаков, при плавке в вакууме испарения серы из расплава практически не происходит из-за низкой упругости пара серы при температурах проведения процесса плавки [5]. Необходимо также отметить отрицательное влияние серы, находящейся в литейных жаропрочных сплавах даже на уровне нескольких ppm ($1\text{ ppm}=0,0001\%$), на стойкость защитных покрытий к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии. Выявлено ухудшение адгезии защитного покрытия к основному металлу из-за диффузии серы в покрытие. Это наблюдается при содержании в сплаве серы $>1\text{ ppm}$. При этом снижается надежность и ресурс защитного покрытия на деталях двигателей [6–8]. Одной из малоизученных примесей в литейных жаропрочных сплавах является фосфор. В научнотехнической литературе имеются противоречивые сведения о влиянии фосфора на свойства жаропрочных сплавов. Из данных работы [9] видно, что при повышении содержания фосфора с 0,0005 до 0,0052% долговечность при испытании на длительную прочность (при 760°C , $\sigma=804\text{ МПа}$) снизилась с 336 до 126 ч соответственно. В работе [10] показано, что в литейном жаропрочном сплаве марки M963 с повышением содержания фосфора с 0,002 до 0,010% существенно снижаются длительная прочность и пластичность при повышенных температурах. Отмечено негативное влияние фосфора на микроструктуру и сопротивление разрушению при 650°C и напряжении 600 МПа модельного деформируемого жаропрочного сплава IN783, содержащего от 0,0034 до 0,016% фосфора [11]. Авторы этой работы показали, что фосфор способствует образованию на границах зерен выделений фазы $\beta\text{-NiAl}$ и фосфи-

дов ниобия. Выделения $\beta\text{-NiAl}$ существенно улучшают сопротивление коррозии по границам зерен в поверхностном слое сплава. Однако при увеличении в сплаве содержания фосфора, зернограничная сегрегация фосфора увеличивается, силы межзатомного взаимодействия на межфазной границе β/γ внутри сплава ослабевают, что приводит к образованию трещин на границах зерен и снижается долговечность сплава.

Таким образом, эти неметаллические включения существенно снижают уровень и стабильность эксплуатационных свойств, а также выход годных лопаток. Жаропрочные никелевые сплавы, из которых изготавливают рабочие лопатки ГТД, представляют собой сложные многокомпонентные системы, возможности повышения свойств которых за счет легирования практически исчерпаны.

Однако в работах [3–5] показано, что, кроме дополнительного микролегирования сплава, свойства материала возможно повысить за счет снижения содержания в материале вредных примесей, последующей фильтрации расплава через пористый пенокерамический фильтр.

Пористые керамические фильтры получили практическое применение в технологии рафинирования сплавов и их использование позволяет до двух раз снизить содержание вредных примесей. Однако в ряде случаев применение фильтра не срабатывает. Имеется ограниченная информация об исходном материале и этапах получения пенокерамического фильтра. Удаление твердых частиц, содержащих вредные примеси в сплавах (кислород, углерод, сера, фосфор, кремний и др.), реализуется прохождением через фильтр расплава, загрязненного примесями.

Проблема управления процессами массообмена расплава с поверхностью фильтра является непростой задачей. Наиболее сложными являются частные технологические режимы в части специфики геометрической формы и размеров фильтра и состава сплава, подвергаемого очистке от примесей. Постоянно растущие требования к чистоте материалов требуют детально анализировать течения расплава и вырабатывать способы управления параметрами, позволяющие повышать эффективность процесса. Упомянутые требования приводят к необходимости применения законов гидродинамики. Методы моделирования для различных внешних и внутренних параметров, действующих на гидродинамику и поведение частиц в потоке, рассмотрены в работе [12]. В связи с важной ролью гидродинамики и режимов течения расплава необходимо знать геометрическую форму каналов в фильтре. Структура каналов и их геометрические размеры зависят от исходного материала фильтра и режима его обработки.

Цель данной работы – изучение особенностей фильтрации примесей при прохождении расплава для получения ультрачистых сплавов на никелевой основе.

Материалы и методы

Для изучения строения и геометрических параметров внутренних пор фильтра и мест осаждения вредных примесей выбрана пористая керамика из оксида алюминия (Al_2O_3) в исходном состоянии и два фрагмента фильтров после прохождения через них литейного высокожаропрочного сплава для монокристаллического литья ЖС36-ВИ двух модификаций: 0,0007% S+20% La и 0,017% P+20% La. Для нейтрализации и удаления из сплава серы и фосфора в расплав добавляли присадку лантана, перед этим расплав предварительно рафинировали магнием.

Химический состав сплава ЖС36-ВИ (по ТУ1-595-4-473) представлен в таблице.

Сплав ЖС36-ВИ предназначен для изготовления охлаждаемых лопаток методом направленной кристаллизации с использованием заправки заданной ориентации.

Сплав ЖС36-ВИ относится к классу безуглеродистых монокристаллических сплавов ($C \leq 0,015\%$), содержит в 2 раза меньше рения (2% (по массе)), чем сплав ЖС32-ВИ, и не содержит тантала, вследствие чего его стоимость ниже более чем в 2 раза.

Сплав ЖС36-ВИ может работать длительное время при температурах до $1100^\circ C$ с забросами до $1150^\circ C$.

Сплав для исследований получен на автоматизированной вакуумной плавильно-разливочной установке ВИАМ-2002 в керамическом тигле вместимостью 20 кг.

Установка представляет собой уникальный комплекс, предназначенный для исследований и разработки технологии получения жаропрочных сплавов. Она состоит из плавильной камеры, источника питания и вакуумной системы, обеспечивающей высокий вакуум до 1,33 Па в течение всего процесса плавки. После термовременной обработки расплав разливали через нагретый пенокерамический фильтр. Металл заливали в стальную трубу с внутренним диаметром 90 мм, с установленной в ней утеплительной вставкой, в которую вмонтирован пенокерамический фильтр, нагретый до $1000^\circ C$.

Содержание легирующих элементов определяли методами оптико-эмиссионной спектроскопии с ионным возбуждением пробы на установке ARL 4460 и волно-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопией на установке S4 EXPLORER.

Содержание серы определяли на анализаторе CS600 фирмы Leco [13], а содержание фосфора – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на установке iCAPQ фирмы Thermo Fisher Scientific.

Расчет фазового состояния фильтра после вакуумного отжига выполнен с помощью программы Tetra.

Для определения диаметра пор и толщины перегородок между порами в исходном фильтре проводили съемку на стереомикроскопе MZ12,5 при увеличении $\times 5$. Математическую обработку выполняли с помощью компьютерной программы ImageExpertPro 3x по 6 снимкам.

Электронно-микроскопические исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) ZEISS EVO MA10. При электронно-микроскопических исследованиях для получения изображения структуры материала использовали сигнал вторичных электронов (secondary electron, SEI). Вторичные электроны позволяют получать лучшее разрешение (< 10 нм), чем отраженные электроны.

Для оценки элементного состава и распределения фаз в материале использовали специальный режим COMPO, изображение в котором формируется обратноотраженными электронами, а его контраст создается за счет разницы средних атомных масс компонентов сплава.

Локальный элементный анализ (МРСА) проводили на растровом электронном микроскопе ZEISS EVO MA10 с помощью энергодисперсионного спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max-80 в режиме наблюдения изображения COMPO.

Подготовку образцов из фрагментов фильтров для поглощения вредных примесей в сплавах осуществляли на оборудовании металлографического центра «Струерс». С помощью отрезного станка фирмы Labogom вырезали образцы в продольном направлении.

Результаты и обсуждение

В результате расчетов установлено, что в исходном материале пенополиуретана в процессе отжига образуются следующие газообразные соединения: 38,702% H_2 ; 0,15347% H_2O ; 5,6099% N_2 ; 0,00119% NH_3 ; 22,189% CO ; 5,298% CO_2 . В твердом состоянии остается углерод (13,214%). Видно, что по сравнению с массой исходного полиуретана масса твердого продукта (углеродного полимера) составляет $\sim 13\%$. Остальные газообразные продукты появляются в процессе отжига и обеспечивают высокую пористость углеродной основы фильтра. На втором этапе получения фильтра, предназначенного для работы при температурах $1500-1650^\circ C$, методами шликерной технологии и последующим спеканием на углеродном пористом каркасе формируют керамическую конструкцию из оксида алюминия.

Химический состав сплава ЖС36-ВИ

Ni	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Ti	Al	C (не более)
Основа	3,5–4,5	5,0–9,0	1,0–2,2	11,0–12,5	1,8–2,3	0,7–1,5	0,7–1,5	5,5–6,2	0,015



Рис. 1. Фрагмент пенокерамического фильтра в исходном состоянии (продольное сечение)

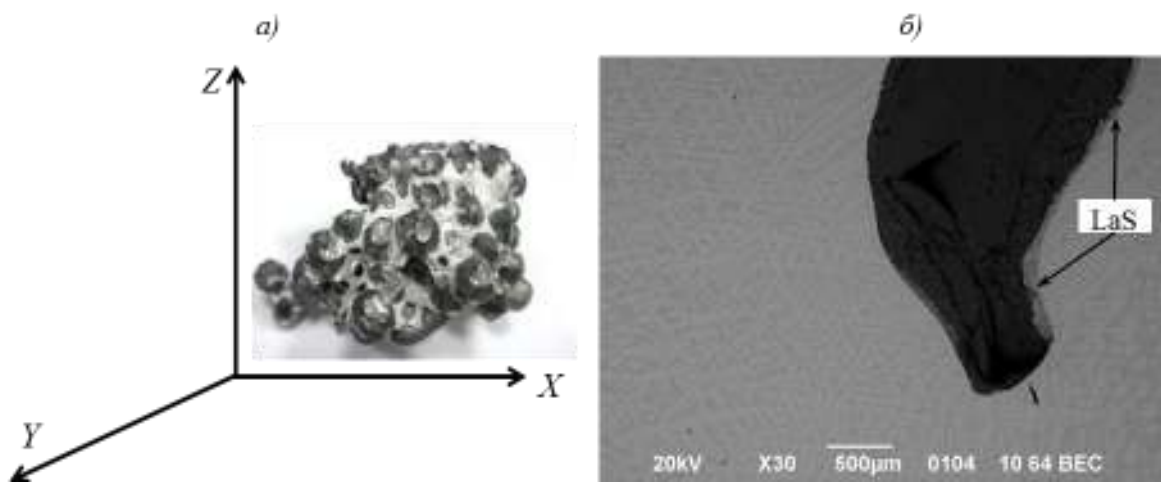


Рис. 2. Общий вид фрагмента фильтра после прохождения расплава (а) и фрагмент перемычки пенокерамического фильтра в месте адгезии частиц (LaS) (б)

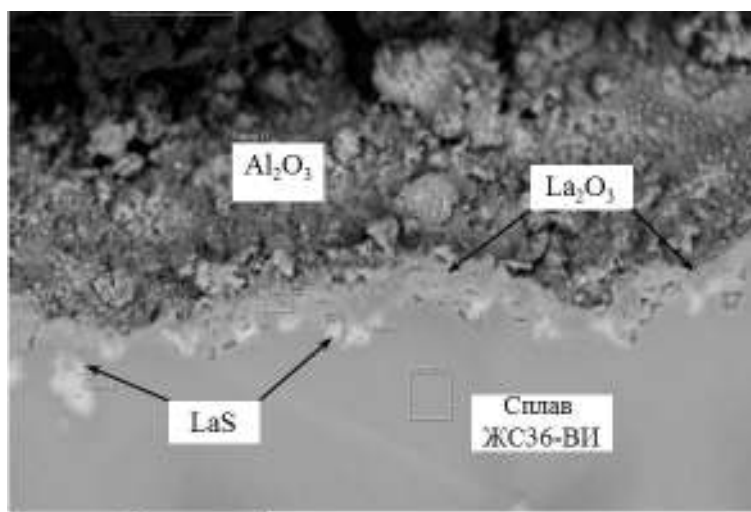


Рис. 3. Фрагмент участка фильтра после прохождения расплава сплава ЖС36-ВИ в зоне границы раздела «сплав–керамика»

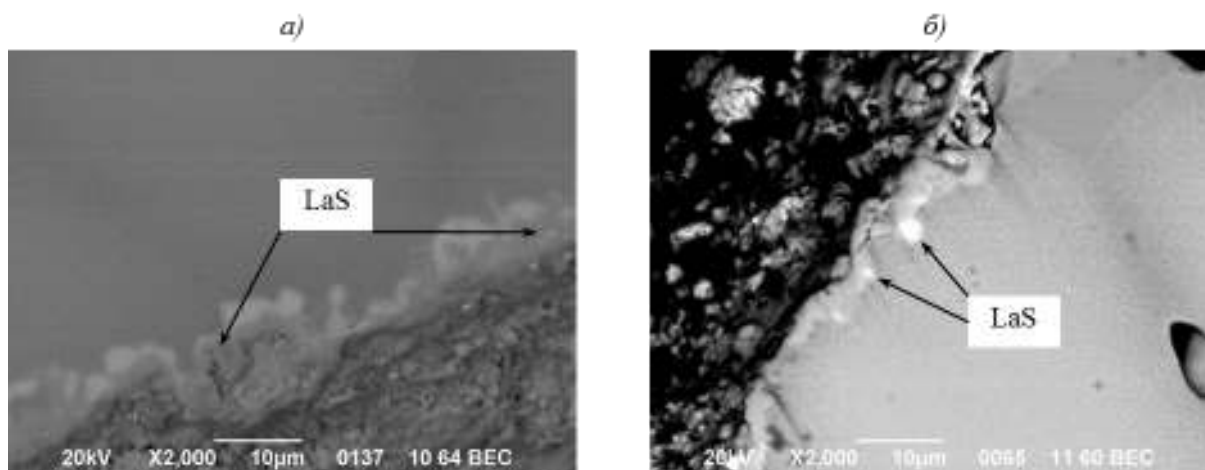


Рис. 4. Сульфиды лантана (LaS), расположенные в нижней части сферической поры (а) и вдоль перемычек (б) керамического фильтра

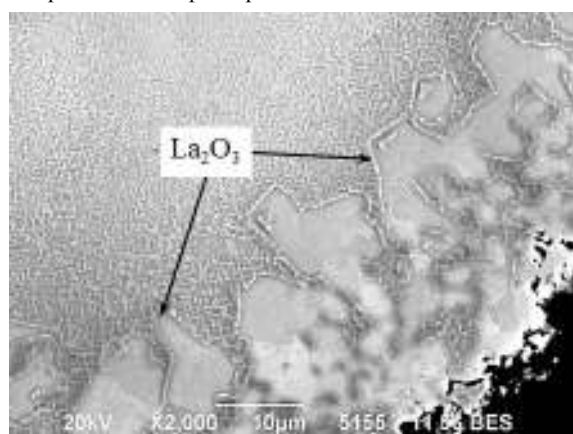


Рис. 5. Оксиды лантана, расположенные в нижней части сферической поры

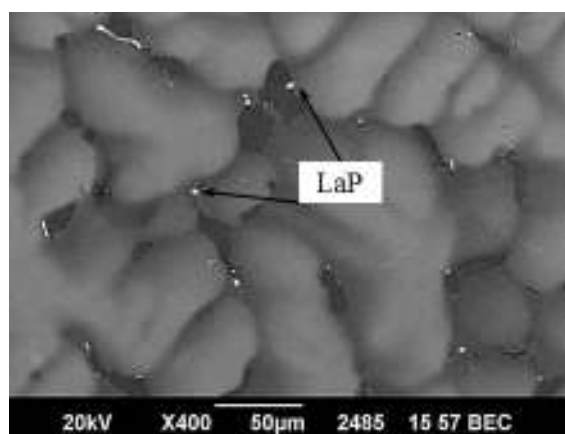


Рис. 6. Частицы LaP, расположенные в междендритных областях по границам эвтектики сплава ЖС36-ВИ после фильтрации

Взвешивание пористого цилиндрического фильтра (с геометрическими размерами – $\varnothing 60$ мм, высота 25 мм) и сравнение его расчетной массы в плотном состоянии (плотность Al_2O_3 : $3,5 \text{ г/см}^3$) показали значение пористости 87%, что согласуется с проведенными расчетами.

На рис. 1 представлен фрагмент пенокерамического фильтра в исходном состоянии. Исследование макроструктуры фильтра после спекания оксида алюминия показало, что он имеет ретикулярную (периодическую) структуру в трехмерном пространстве по оси Z, вдоль которой течет расплав. Фильтр представляет собой чередование сферических пор диаметром 4–5 мм, соединенных между собой выпуклыми отверстиями диаметром ~ 2 мм, иногда с перемычкой в отверстиях.

Для исследования особенностей фильтрации примесей серы и фосфора изучали фрагменты фильтров двух плавок после прохождения через них расплава сплава ЖС36-ВИ, содержащего 0,0005% S или 0,020% P.

Для рафинирования расплава и связывания вредных примесей серы и фосфора в тугоплавкие соедине-

ния, температура плавления которых выше, чем температура расплава, при плавке вводили редкоземельные металлы, в частности 0,20% лантана [14–24].

Как видно из данных рис. 2, образовавшиеся в расплаве соединения с серой в виде сульфида лантана (LaS) адсорбировались на стенках сферических пор и перемычках пенокерамического фильтра при разливке.

Исследование фрагмента фильтра после прохождения расплава сплава ЖС36-ВИ (0,0005% S) показало (рис. 3), что на границе раздела «сплав–керамика» формируется слой, в состав которого входят оксиды лантана (толщина слоя составляет 10 мкм). Сульфиды лантана (LaS) адсорбируются на подложке из оксидов лантана (La_2O_3). Количество и размер частиц, расположенных в нижней части сферической поры керамического фильтра больше, чем в верхней части сферической поры и перемычках (рис. 4).

При исследовании фрагмента фильтра после прохождения расплава сплава ЖС36-ВИ (0,020% P) установлено (рис. 5), что на границе раздела «сплав–керамика» формируется слой из оксидов лантана

(толщина – до 60 мкм в нижней части сферической поры). Частиц, содержащих фосфор, на границе раздела «сплав–керамика» не обнаружено.

Микроструктура, представленная на рис. 6, имеет характерное строение для всего объема закристаллизованного сплава ЖС36-ВИ. Частицы, в состав которых входит фосфор, выявлены в междендритных областях и на границах между первичными кристаллами γ' -фазы в виде округлых частиц размером 1–2 мкм.

Полученные в работе результаты подтверждают данные, полученные ранее в работе [23]. Фосфор как примесь внедрения в виде сложных соединений концентрируется на границах фаз и на структурных дефектах. Фосфор с лантаном образуют устойчивые соединения благоприятной морфологии (частицы округлой формы размером 1–2 мкм) с температурой плавления 2150°C [23, 24].

Заключения

Методами электронной микроскопии изучено строение пенокерамического фильтра из оксида

алюминия в исходном состоянии и после прохождения через него расплава сплава ЖС36-ВИ с добавкой лантана, содержащего повышенное количество примесей серы или фосфора. Выявлены места адгезии сульфида лантана, расположенные на границе раздела «сплав–керамика» на подслое из оксидов лантана. В отличие от серы, соединения фосфора в результате присадки лантана и последующей фильтрации расплава из металла не удаляются. Выделений частиц, содержащих LaP, из расплава на поверхность фильтра не наблюдается.

Таким образом, можно заключить, что сера, являясь сильным поверхностно-активным элементом, в виде сульфидов лантана удаляется из расплава (адсорбируется на поверхности фильтра) при прохождении сплава через пенокерамический фильтр. Фосфор образует тугоплавкие соединения с РЗМ, однако является слабым поверхностно-активным элементом, поэтому частицы, содержащие LaP, не оседают на поверхности фильтра [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP. С. 20–25.
3. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-1-1.
4. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Герасимов В.В., Бондаренко Ю.А. Влияние примесей серы и фосфора на свойства монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-3-9.
5. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого сплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Часть 1 // *Электрометаллургия*. 2014. №3. С. 18–23.
6. 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 // *Superalloys-1996*. 1996. P. 71–80.
7. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys // *Superalloys-2000*. 2000. P. 387–392.
8. Irvine J.D., Vogt R.G., Bierstine D.L. Ultra low sulfur superalloy casting and method of making: pat. 5922148 US; publ. 13.07.99.
9. Yaoxiao Zhu, John Radavich et al. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L // *Superalloys-2000*. 2000. P. 329–339.
10. Chao YUAN, Fengshi YIN. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a Cast Ni-base Superalloy // *J. Mater. Sci. Technol.* 2002. Vol. 18. No. 6. 555–557.
11. Yu L.X., Sun Y.R., Sun W.R., Sub X.F., Guo S.R., Hu Z.Q. The influence of phosphorus on the microstructure and stress-rupture properties in low thermal expansion superalloy // *Mater. Sci. And Eng. A*. 2010. Vol. 527. No. 4–5. P. 911–916.
12. Авдудевский В.С., Полежаев В.И. Гидромеханика и теплообмен при получении материалов. М.: Наука. 1990. 296 с.
13. Механик Е.А., Мин П.Г., Гундобин Н.В., Растегаева Г.Ю. Определение массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
14. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнолегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // *Электрометаллургия*. 2015. №5. С. 12–15.
15. Сидоров В.В., Горюнов А.В., Колмыкова Н.А. Влияние лантана на жаростойкость монокристаллов из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ, содержащего рений и рутений // *МиТОМ*. 2012. №3. С. 23–27.

16. Сидоров В.В., Тимофеева О.Б., Калицев В.А., Горюнов А.В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 8–13.
17. 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: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №1. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2016).
18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2016).
19. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Перспективные материалы*. 2001. №1. С. 23–34.
20. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Влияние фосфора и кремния на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // *МиТОМ*. 2015. №6. С. 55–59.
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 из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 32–38.
22. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние лантана на качество и эксплуатационные свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
23. Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Ломберг Б.С., Морозова Г.И. Эволюция структуры и фазового состава деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД с усложнением из легирования // *МиТОМ*. 2015. №3. С. 8–12.
24. 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: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-2-2.
25. Филиппов К.С., Бурцев В.Т., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Исследование поверхностного натяжения и плотности расплава никеля, содержащего примеси серы, фосфора и азота // *Физика и химия обработки материалов*. 2013. №1. С. 52–56.