



УДК 621.775.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-4-4

ИСТИРАЕМЫЙ УПЛОТНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

В.П. Мигунов

Д.П. Фарафонов

М.Л. Деговец

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.

УДК 621.775.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-4-4

В.П. Мигунов¹, Д.П. Фарафонов¹, М.Л. Деговец¹

ИСТИРАЕМЫЙ УПЛОТНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Исследована возможность создания истираемого уплотнительного материала из металлических волокон с высокими эксплуатационными свойствами, работоспособного в конструкции компрессора ГТД с лопатками и статорными деталями из титановых сплавов. В качестве исходного материала для истираемого уплотнения радиального зазора компрессора предлагается использовать дискретные волокна из медных сплавов.

Ключевые слова: *истираемость, проточный тракт, компрессор газотурбинного двигателя, металлические волокна, уплотнительный материал.*

V.P. Migunov, D.P. Farafonov, M.L. Degovets

ABRADABLE SEALING MATERIAL MADE OF FIBERS FROM COPPER ALLOYS

Possibility of creation of abradable sealing material from metal fibers with high operational properties, workable in GTE compressor with blades and stator parts made of titanium alloys was investigated. Usage of discrete fibers from copper alloys as an initial material for abradable seals of radial gap in compressor has been offered.

Keywords: *abradability, flow duct, gas turbine engine compressor, metal fibers, sealing material.*

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

Проблеме создания эффективных уплотнений радиальных зазоров проточного тракта ГТД уделяется много внимания конструкторами, производителями авиационных двигателей и научно-исследовательскими институтами всего мира. Такой интерес связан с большим влиянием системы уплотнения на удельный расход топлива и срок службы дорогостоящих лопаток турбины и компрессора ГТД. Без решения этой про-

блемы невозможно выполнение одной из основных задач развития двигателестроения в России – повышения экономичности двигателей гражданской авиации на 10–15% [1, 2]. Известно, что утечка расходуемого рабочего газа через радиальный зазор приводит к равному по величине (в процентах) снижению КПД ступени турбины [3]. Однако уменьшение величины радиального зазора связано с повышенным износом лопаток по торцам и опасностью их поломки вследствие контакта со статором, возникающего в результате маневра самолета, перегрузки при посадке, колебаний ротора и корпуса при работе двигателя на нерасчетных режимах, различия температур вращающихся и неподвижных частей уплотнения, скрутки ротора, связанной с установочными нагрузками деформации корпуса, вибрации конструкции и работы в нестационарном режиме.

Решение этой проблемы заключается, в основном, в разработке новых материалов или покрытий: истираемых – для статора и абразивно-износостойких – для ротора (торцы лопаток). Сложность решения проблемы состоит в том, что эти материалы должны работать при высоких температурах (до 1250°C в турбине) и при контактном взаимодействии ротора и статора.

Создание эффективного, технологичного, хорошо истираемого уплотнительного материала для турбины высокого давления является наиболее сложной задачей [4]. Вследствие экстремально высокой рабочей температуры и скорости газового потока эти материалы должны сочетать истираемые свойства с высокой жаростойкостью и эрозионной стойкостью. В этом направлении активно ведутся поиски и уже имеются определенные успехи [4–7].

Для истираемых материалов компрессора нет жестких требований к жаростойкости, так как рабочие температуры не превышают 450–500°C, однако и здесь есть свои специфические требования.

В настоящее время наиболее широко в мировой практике в конструкции компрессоров применяют титановые сплавы. Титановые сплавы при сравнительно небольшой плотности $\sim 4,5 \text{ г/см}^3$ (против $\sim 8 \text{ г/см}^3$ у сталей) обладают соизмеримым со сталями пределом прочности. Поэтому, заменяя стальные детали на титановые, можно получить заметное снижение массы компрессора, а значит и всего двигателя в целом [3]. В то же время с увеличением температуры механические свойства титановых сплавов заметно ухудшаются [8].

Исходя из требований к весовым характеристикам авиадвигателей, рабочие лопатки в компрессорах ГТД также изготавливаются из титановых сплавов, что обуславливает необходимость введения дополнительных требований и к уплотнительным материалам.

При взаимодействии с торцами титановых лопаток эти материалы не должны вызывать избыточного перегрева в зоне взаимодействия, возникающего при трении. Это необходимо для предотвращения структурных изменений, сопровождающихся снижением прочности титанового сплава [9].

Кроме того, при значительном перегреве, который также может быть следствием контактного взаимодействия лопаток ротора со статором, в условиях избытка кислорода в компрессоре возможно возгорание титанового сплава – явление, называемое «титановый пожар» [3]. При горении титана температура поднимается до 3000°C, и это может привести к быстрому разрушению двигателя и самолета. Часто лишь по этой причине для статорных ступеней компрессора применяют жаропрочные стали и никелевые сплавы, жертвуя весовым преимуществом титановых сплавов [10].

Материалы и методы

Общие требования, которым должны отвечать истираемые уплотнительные материалы компрессора (в идеале), следующие [11]:

- обеспечение минимального износа деталей ротора компрессора (благодаря высокой истираемости);
- отсутствие перегрева и возгорания деталей из титановых сплавов в результате трения (врезания) ротора со статором;
- высокая эрозионная стойкость уплотнения в условиях газового потока с твердыми частицами;
- стойкость к циклическим перепадам температуры;
- коэффициент теплового расширения, обеспечивающий надежное соединение истираемого материала (покрытия) со статором;
- стабильность свойств в течение длительного времени при рабочих температурах;
- химическая стойкость к соленой воде (коррозии), топливу двигателя, смазочному маслу для гидравлических систем, жидкостям для промывки двигателя;
- низкая энергия врезания или контактного трения;
- отсутствие перехода материала с поверхности истираемого уплотнения на торцы лопаток и наоборот;
- отсутствие утечек газа через открытую пористость в материале;
- низкая стоимость и ремонтпригодность.

Главным требованием для этих материалов остается предотвращение от перегрева и возгорания титановых сплавов, т. е. обеспечение безопасной эксплуатации двигателя

и самолета, и этому требованию они соответствуют, в том числе и благодаря другим свойствам [12].

В России и за рубежом чаще всего для уплотнения радиальных зазоров компрессора применяют так называемые «совместимые с титановыми лопатками» материалы на основе алюминия или никеля, содержащие в своем составе равномерно распределенные частицы нитрида бора или графита, выполняющие роль «твердой смазки». Такие материалы наносят на статорные детали с помощью методов пламенного или плазменного напыления. Они могут работать в контакте с титановыми деталями, не вызывая значительного их перегрева, благодаря низкому пределу прочности при сдвиге алюминиевой или никелевой матрицы и наличию пор, заполненных «твердой смазкой», улучшающей истираемость этих материалов [12, 13]. Типичная микроструктура пористого уплотнительного материала с алюминиевой матрицей представлена на рис. 1.

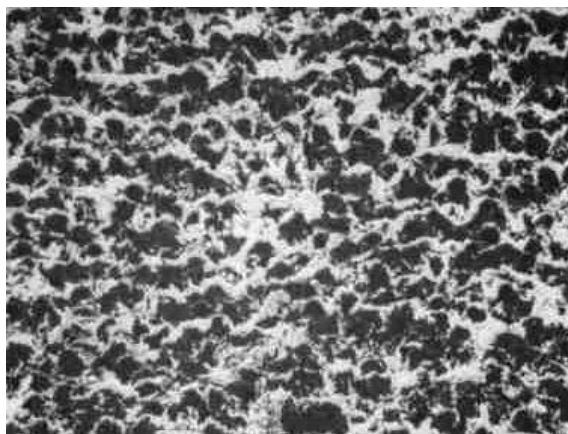


Рисунок 1. Микроструктура пористого уплотнительного материала с алюминиевой матрицей

Все подобные существующие материалы являются «совместимыми с титановыми лопатками», однако они не удовлетворяют представленным выше требованиям в полном объеме и, в первую очередь, это связано с необходимым сочетанием обычно противоположных свойств: истираемость/эрозионная (газоабразивная) стойкость и жаростойкость/термическая (термоциклическая) стойкость.

В последние годы специалисты ВИАМ занимаются разработкой высокопористых истираемых материалов на основе дискретных волокон из металлических сплавов. Такая возможность появилась в связи с разработкой технологии изготовления волокон методом экстракции висящей капли расплавленного металла (в ГОУ ВПО «МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского») [14–17]. Материалы из металлических волокон обладают уникальным комплексом физико-механических свойств и служебных характеристик, сочетанием высокой пористости с высокими характеристиками пластичности,

прочности, низкими коэффициентами термического расширения и теплопроводности, высокими стойкостью к окислению, эрозионной стойкостью и истираемостью, необходимыми для создания уплотнительных материалов [18]. Это позволяет таким материалам противостоять высокому давлению, выдерживать резкие теплосмены и высокие температуры. Высокая пористость (до 80–85%) и пластичность позволяют использовать такие истираемые податливые материалы так, что рабочие зазоры двигателя могут быть минимизированы с соответствующим увеличением КПД вследствие снижения утечки газа между торцами лопаток и статором.

Микроструктура истираемого уплотнительного материала из металлических волокон показана на рис. 2.

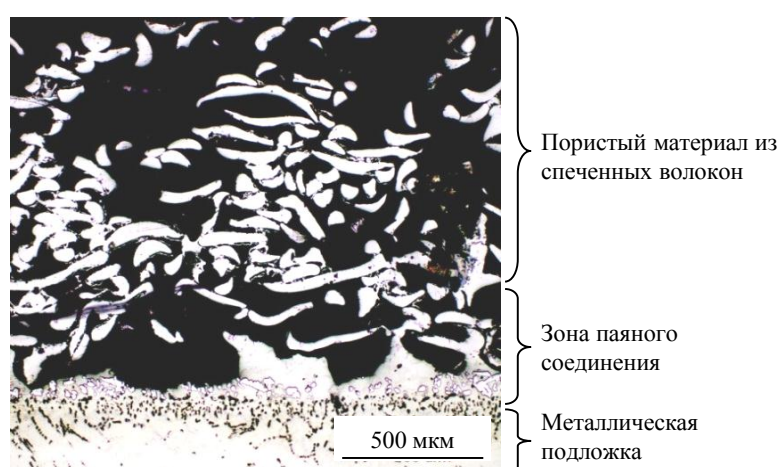


Рисунок 2. Микроструктура истираемого уплотнительного материала из металлических волокон

Благодаря высокой пористости истираемость материалов, оцениваемая по соотношению износов уплотнения и лопатки, составляет до 10:1 и более, в то время как истираемость существующих газопламенных и газоплазменных покрытий не превышает 6:1.

С учетом всех преимуществ этих материалов проведена отработка технологии изготовления и исследованы свойства истираемых уплотнительных материалов из волокон медных сплавов для работы в паре с титановыми лопатками.

Выбор медных сплавов при изготовлении волокон для истираемых уплотнений, работающих в паре с титановыми лопатками, обусловлен рабочей температурой (450–500°C), отсутствием искрения или низкой энергией возникающих в результате трения медных сплавов искр, хорошими антифрикционными свойствами и высокой коррозионной стойкостью.

Для изготовления опытной партии дискретных волокон выбран сплав меди с никелем (монель), содержащий в своей основе медь в количестве не менее 27%, и отработа-

ны технологические параметры изготовления дискретных волокон методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР).

С использованием процессов прессования и спекания волокон получены образцы истираемого уплотнительного материала с плотностью 2–2,5 г/см³ для исследования его основных эксплуатационных свойств (рис. 3).



Рисунок 3. Образцы истираемого уплотнительного материала из волокон медного сплава

Исследования экспериментальных образцов включали в себя испытания на жаростойкость и термоциклирование при рабочей температуре компрессора (450°C), эрозийную стойкость, коррозионную стойкость и испытания на истираемость в паре с контртелом из титанового сплава.

Жаростойкость определяли при 450°C с выдержкой в печи в течение 100 ч. Измерение массы образцов осуществляли каждые 25 ч.

Испытание на истираемость (врезание) истираемого уплотнительного материала из волокон сплава монель проводили в паре с контртелом из титанового сплава типа ВТ8. Методика испытаний на истираемость (врезание) основана на измерении износа при контактном взаимодействии образца уплотнительного материала и вращающегося образца – имитатора лопатки – при их сближении на заданную величину с заданной скоростью [14].

Проведены ускоренные коррозионные циклические испытания образцов из волокон медного сплава при 450°C. Испытания проводили по режиму:

- нагрев образцов при температуре 450°C в течение 1 ч в электропечи с воздушной атмосферой;
- подсуживание образцов на воздухе в течение 1–2 мин;
- охлаждение распылением 3%-ного раствора хлористого натрия или выдержка в парах кипящего 3%-ного раствора хлористого натрия в течение 1–3 мин;
- выдержка в камере влажности в течение 22 ч.

Продолжительность испытаний по приведенному режиму составила 10 циклов.

Результаты

В таблице представлены свойства образцов истираемого уплотнительного материала из волокон медного сплава в сравнении с серийным отечественным материалом АНБ на основе алюминия с наполнителем из нитрида бора, применяемым для уплотнения радиальных зазоров в компрессоре.

Основные эксплуатационные свойства истираемого уплотнительного материала из волокон медного сплава в сравнении с истираемым покрытием АНБ

Свойства	Значения свойств для	
	уплотнительного материала из волокон медного сплава	покрытия АНБ
Плотность, г/см ³	2–2,5	2–2,3
Рабочая температура, °С	≥450	≤450
Жаростойкость (привес после 100 ч при 450°С), %	≤0,53	0,2–0,3
Термостойкость (число циклов 450⇌20°С без видимых разрушений)	≥100	≥100
Истираемость (соотношение износов уплотнительного материала и лопатки)	≥10:1	(3–5):1
Эрозионная стойкость, усл. ед.	≥950	500–700

По результатам испытаний образцов истираемого материала на жаростойкость максимальный привес после 100 ч выдержки в печи при 450°С составил 0,5%, при этом после 50 ч привес образцов прекратился вследствие образования на поверхности волокон оксидной пленки, препятствующей дальнейшему окислению металла, что свидетельствует об очень высокой сопротивляемости окислению этого материала при 450°С и о его возможной работоспособности при более высоких температурах.

По результатам испытаний эрозионной стойкости, определение которой проводилось при обдуве исследуемого материала скоростным потоком воздуха с взвешенными в нем твердыми абразивными частицами с последующим измерением относительной потери массы образца, экспериментальный материал превосходит существующие «совместимые с титановыми лопатками» материалы.

Результаты испытаний на врезание показали, что материал из волокон медного сплава обладает очень высокой истираемостью – не менее 10:1, свойственной и для пористых материалов из волокон других сплавов, разработанных и исследованных ранее (систем Ni–Cr, Fe–(Ni)–Cr–Al–Y и др.), при этом не происходит выкрашивания и наволакивания уплотнительного материала на имитатор лопатки при их контактном взаимодействии. При взаимодействии образцов пары трения не наблюдалось свечения, ха-

ракторного для взаимодействия металлических материалов при высокоскоростном трении при их перегреве.

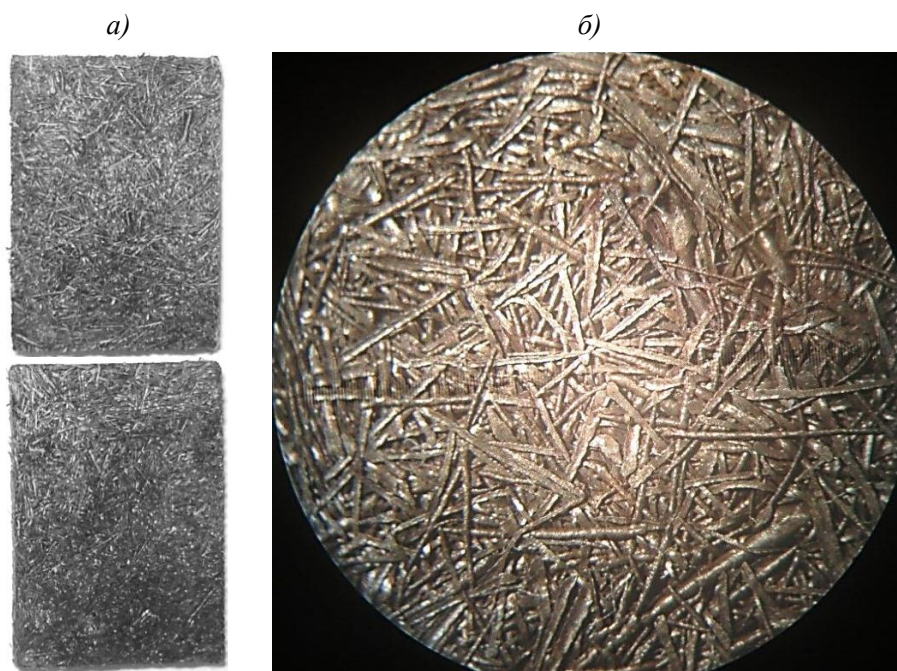


Рисунок 4. Образцы истираемого уплотнительного материала из волокон медного сплава после 10 циклов ускоренных коррозионных испытаний:

a – общий вид; *б* – микроструктура ($\times 16$)

Полученные при исследовании коррозионной стойкости экспериментальные данные свидетельствуют о том, что истираемый уплотнительный материал из волокон медного сплава обладает высокой коррозионной стойкостью в условиях 98%-ной влажности и воздействия хлор-ионов. После 10 циклов испытаний материал сохраняет свою форму, на поверхности волокон наблюдается серая оксидная пленка, частично удаляемая в процессе промывки образцов с применением ультразвуковой установки, при этом волокна на отдельных участках образцов становятся такими же блестящими, как на исходных образцах (рис. 4).

Обсуждение и заключения

Результаты всех проведенных исследований показали, что материал из дискретных волокон медного сплава является перспективным в качестве уплотнения радиальных зазоров компрессора ГТД и по всем исследованным свойствам заметно превосходит существующие «совместимые с титановыми лопатками» уплотнения. Целесообразно проведение дальнейших исследований свойств этого материала, в том числе в составе технологических двигателей.

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. Виноградов А.С., Бадыков Р.Р., Шпаков И.Д. Исследование герметичности радиально-торцевого контактного уплотнения опоры компрессора авиационного двигателя на различных режимах работы //Вестник СГАУ. 2012. №3. С. 260–264.
3. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО «Авиадвигатель». 2006. С. 278–280.
4. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 94–97.
5. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А. Тонкопленочные покрытия для уплотнительных истираемых материалов на основе дискретных волокон для проточного тракта ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 04 (viam-works.ru).
6. Sporer D., Wilson S., Giovannetti I., Refke A., Giannozzi M. On the potential of metal and ceramic based abrasives in turbine seal applications /Proceedings of the 36-th turbomachinery symposium. Texas A&M University, Turbomachinery Laboratory. 2007. P. 79–86.
7. Potter D.J., Chai Y.W., Tatlock G.J. Improvements in honeycomb abradable seals //Materials at High Temperatures. 2009. V. 26. №2. P. 127–135.
8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.
9. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
10. Анташев В.Г., Ночовная Н.А. Современное состояние и тенденции развития исследований в области титановых сплавов /В сб.75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 70–74.
11. Zheng N.X., Däubler M.A., Schweitzer K.K., Hensle W., Schlegel H. Development of air seal system for modern jet engines. Munich: MTU Aero Engines GmbH. 2003. P. 1–9.

12. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Изотова А.Ю., Новак А.В. Пожаробезопасные титановые сплавы и особенности их применения //Титан. 2012. №4. С. 42–46.
13. Sporer D., Wilson S., Dorfman M. Ceramics for abradable shroud seal applications //Advanced ceramic coatings and interfaces. 2009. V. 30. P. 39–53.
14. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 15–20.
15. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Пористоволокнистый материал сверхнизкой плотности на основе металлических волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 38–41.
16. Борисов Б.В. Разработка технологии получения волокон и пористых материалов из жаростойких сплавов методом экстракции висящей капли расплава: Автореф. дисс. к.т.н. М.: МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2011. 19 с.
17. Серов М.М., Борисов Б.В. Получение металлических волокон и пористых материалов из них методом экстракции висящей капли расплава //Технология легких сплавов. 2007. №3. С. 62–65.
18. Мигунов В.П. Уплотнительные материалы /В сб. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: Науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 1994. С. 344–346.
19. Способ получения пористого истираемого материала из металлических волокон: пат. 2382828 Рос. Федерация; опубл. 28.04.2008.
20. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.

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. Vinogradov A.S., Badykov R.R., Shpakov I.D. Issledovanie germetichnosti radial'no-torcevogo kontaktnogo uplotnenija opory kompressora aviacionnogo dvigatelja na razlichnyh rezhimah raboty [Investigation tightness radial mechanical contact seal sup-

- port aircraft engine compressor at different operating modes] //Vestnik SGAU. 2012. №3. S. 260–264.
3. Inozemcev A.A., Sandrackij V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm': OAO «Aviadvigatel'». 2006. S. 278–280.
 4. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L., Stupina T.I. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnogo trakta GTD [Sealing materials for GTD flow path] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 94–97.
 5. Rozenenkova V.A., Solncev St.S., Mironova N.A. Tonkoplechnye pokrytija dlja uplotnitel'nyh istiraemyh materialov na osnove diskretnyh volokon dlja protochnogo trakta GTD [Thin-film coating for sealing abrasive materials on the basis of discrete fibers to the flow path of GTD] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 04 (viam-works.ru).
 6. Sporer D., Wilson S., Giovannetti I., Refke A., Giannozzi M. On the potential of metal and ceramic based abrasives in turbine seal applications /Proceedings of the 36-th turbomachinery symposium. Texas A&M University, Turbomachinery Laboratory. 2007. P. 79–86.
 7. Potter D.J., Chai Y.W., Tatlock G.J. Improvements in honeycomb abradable seals //Materials at High Temperatures. 2009. V. 26. №2. P. 127–135.
 8. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva [Titanium alloys. The composition, structure and properties]. Spravochnik. M.: VILS–MATI. 2009. 520 s.
 9. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Effect of heat treatment on the structure and properties of heat-resistant titanium alloy blades for HPC] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
 10. Antashev V.G., Nochovnaja N.A. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitiya issledovanij v oblasti titanovyh splavov [Current status and trends of research in the field of titanium alloys] /V sb.75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 70–74.
 11. Zheng N.X., Däubler M.A., Schweitzer K.K., Hensle W., Schlegel H. Development of air seal system for modern jet engines. Munich: MTU Aero Engines GmbH. 2003. P. 1–9.
 12. Nochovnaja N.A., Alekseev E.B., Izotova A.Ju., Novak A.V. Pozharobezopasnye titanovye splavy i osobennosti ih primenenija [Fireproof titanium alloys and features of their application] //Titan. 2012. №4. S. 42–46.

13. Sporer D., Wilson S., Dorfman M. Ceramics for abradable shroud seal applications //Advanced ceramic coatings and interfaces. 2009. V. 30. P. 39–53.
14. Migunov V.P., Farafonov D.P. Issledovanie osnovnyh jekspluacionnyh svojstv novogo klassa uplotnitel'nyh materialov dlja protochnogo trakta GTD [Investigation of the basic operational properties of a new class of materials for sealing the flow path GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 15–20.
15. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L. Poristovoloknistyj material sverhnizkoj plotnosti na osnove metallicheskih volokon [Porous and fibrous material, ultra low density on the basis of metal fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 38–41.
16. Borisov B.V. Razrabotka tehnologii poluchenija volokon i poristyh materialov iz zharostojkih splavov metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Development of technology for the manufacture of fibers and porous materials of the heat-resistant alloys by hanging drop melt extraction]: Avtoref. diss. k.t.n. M.: MATI–RGTU im. K.Je. Ciolkovskogo. 2011. 19 s.
17. Serov M.M., Borisov B.V. Poluchenie metallicheskih volokon i poristyh materialov iz nih metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Preparation of metallic fibers and porous materials, including extraction method hanging molten droplet] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №3. S. 62–65.
18. Migunov V.P. Uplotnitel'nye materialy [Sealing materials] /V sb. Aviacionnye materialy na rubezhe XX–XXI vekov: Nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 1994. S. 344–346.
19. Sposob poluchenija poristogo istiraemogo materiala iz metallicheskih volokon [A method for producing a porous abradable material of metal fibers]: pat. 2382828 Ros. Federacija; opubl. 28.04.2008.
20. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Prioritetnye napravlenija razvitija tehnologij proizvodstva zharoprochnykh materialov dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [Priorities for the development of production technologies, high temperature materials for aircraft engine] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2013. №3. S. 47–54.