

УДК 621.452.3

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ РАДИАЛЬНО-ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ОПОР РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2015 С. В. Фалалеев<sup>1</sup>, П. В. Бондарчук<sup>1</sup>, И. Д. Ибатуллин<sup>2</sup>, Р. Р. Бадыков<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

В статье представлено перспективное радиально-торцовое контактное уплотнение повышенного ресурса. Высокая эффективность радиально-торцового уплотнения обеспечивается за счёт совместного применения принципов гидростатической и гидродинамической смазки. Гидродинамический эффект достигается за счёт нанесения структуры микроканалов на вращающейся втулке. Представлена зависимость значения гидродинамической силы в щели для фиксированной величины зазора от частоты вращения ротора. Изготовлен опытный образец и проведены испытания на динамическом стенде, предназначенном для реализации условий эксплуатации уплотнений опор в составе авиационного двигателя. Представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований. Предложены пути повышения надёжности уплотнения за счёт улучшения механических свойств поверхностей материалов. Представлена схема развития функционального отказа уплотнительного узла. Указаны наиболее неблагоприятные режимы работы уплотнения и основные причины повышенного износа уплотнительных поверхностей. Предложены способы достижения высоких антифрикционных характеристик контактирующих поверхностей при помощи наноструктурированных беспористых хром-алмазных покрытий. Рассмотрены вопросы создания перспективных покрытий с положительным градиентом механических свойств по глубине на основе антифрикционных, антизадириных серебряно-алмазных покрытий и использования технологии диффузионного молекулярного армирования. Указана важность содержания в масле антифрикционных и антизадириных присадок.

*Радиально-торцовое контактное уплотнение, гидродинамические канавки, утечки, ресурс, защитное покрытие.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-345-353

### Введение

Разработка новых авиационных двигателей с улучшенными характеристиками вызывает необходимость увеличения основных параметров цикла работы двигателя: степени повышения давления воздуха в компрессоре, температуры газа перед турбиной и частот вращения роторов [1,2]. Эти факторы приводят к повышению силовых и температурных нагрузок на узлы двигателя, в том числе и на уплотнения.

Основным средством герметизации масляных полостей компрессорных опор газотурбинного двигателя по-прежнему служат контактные уплотнения, в том числе и радиально-торцовые контактные уплотнения (рис. 1). Главный элемент конструкции уплотнения – графитовое поршневое кольцо. Оно выполняется с разрезом (вид С), устанавливается с натя-

гом внутрь статора, центрируясь по наружной радиальной поверхности А и прижимаясь к ней за счёт сил упругости.

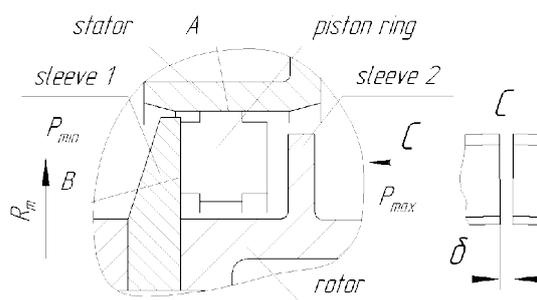


Рис. 1. Схема радиально-торцового контактного уплотнения

Со стороны вала кольцо находится между двух втулок 1 и 2. При работе двигателя за счёт разности давлений в уплотняемой полости  $P_{max}$  и в масляной полости  $P_{min}$  графитовое кольцо прижимается к торцу втулки 1 (поверхность В) и к стато-

ру (поверхность А). Конструкция поршневого кольца проектируется таким образом, чтобы сила трения по поверхности А была больше силы трения по поверхности В. При выполнении этого условия поршневое кольцо не вращается и износ происходит только в контакте по поверхности В. В случае, когда силы трения по этим поверхностям имеют близкие значения, кольцо начинает вращаться. Частота вращения графитового кольца определяется соотношением этих сил трения. Для обеспечения гарантированного прижима кольца к поверхности В, особенно на переходных режимах работы двигателя, в конструкцию уплотнения иногда вводится тарельчатая пружина.

Поверхности А и В должны быть перпендикулярны друг другу. В случае нарушения перпендикулярности контактных поверхностей графитовое кольцо сохраняет контакт по плоскости с поверхностью А. При этом контакт по поверхности В становится линейным.

Контактное давление при этом возрастает, одновременно растёт температура в зоне контакта. Происходит изнашивание рабочих поверхностей как вращающейся втулки, так и графитового кольца с одновременным ростом коэффициента трения. Наступает момент, когда сила трения по поверхности В будет преобладать и кольцо уплотнения начинает вращаться вместе с валом. Процесс этот носит хаотический характер и при переходе с режима на режим меняется как перекося поверхностей, так и скорость вращения кольца. Причиной перекося, как правило, являются температурные деформации втулок и корпуса [3]. Большая часть утечек уплотнения обусловлена наличием разреза в кольце. При изнашивании графитового кольца по поверхности А зазор  $\delta$  (рис. 1) увеличивается, вследствие чего возрастают утечки воздуха в масляную полость.

Конструктивное совершенство контактных уплотнений оценивается по параметру нагрузки «давление-скорость  $P \cdot V$ », который суммирует факторы нагрева поверхности, средней скорости и ин-

тенсивности изнашивания [4,5]. В настоящее время для традиционных конструкций достигнута величина 50 МПа·м/с при максимальной скорости скольжения 100 м/с и температуре 700 К [6]. В условиях роста как скоростей вращения, так и диаметров роторов (исходя из потребности сохранять ротор двигателя жёстким), этой достигнутой величины недостаточно. Для двигателя Trent 1000 частота вращения ротора высокого давления составляет 13500 об/мин. В случае применения радиально-торцового уплотнения при среднем радиусе уплотнения (рис. 1)  $R_m = 100$  мм линейная скорость скольжения составит 141 м/с. Необходимо отметить, что в уплотнительной технике накоплен потенциал, позволяющий эффективно использовать гидродинамическую смазку в уплотнениях [7-12]. Поэтому можно сделать вывод о том, что создание двигателя следующего поколения невозможно без наличия высокоэффективных уплотнений масляных полостей, работоспособных при высоких скоростях вращения и повышенном давлении. Также необходимо отметить, что для двигателей и энергетических установок, находящихся в эксплуатации, всегда актуальна проблема повышения межремонтного ресурса, который ограничивается, в том числе, и уплотнениями. Поэтому повышение надёжности применяемых уплотнений и расширение их диапазона работы является задачей, решение которой позволит сократить расходы за счёт увеличения межремонтного ресурса и уменьшения количества аварий двигателей.

### Постановка задачи

На рис. 2 показана опора ротора авиационного двигателя с установленным радиально-торцовым контактным уплотнением.

Уплотнительный узел разделяет воздушную полость компрессора и масляную полость опоры. В зону контакта уплотнения по поверхности А принудительно подаётся масло. Несколько струйных форсунок подают масло под козырёк втулки, где

за счёт центробежных сил образуется масляная ванна и масло под давлением поступает в зазор.

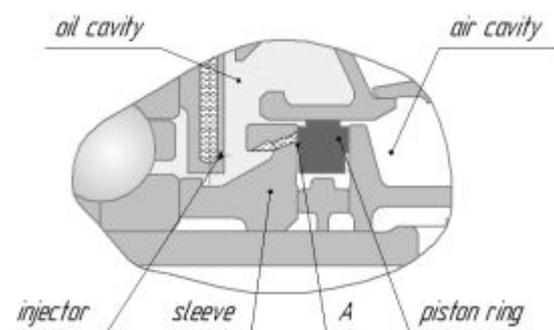


Рис. 2. Продольный разрез узла опоры авиационного двигателя

Этот эффект обеспечивает гидростатическую смазку зоны контакта. Поршневое кольцо уплотнения изготовлено из пирографита, на контактную поверхность стальной втулки нанесено хром-молибденовое покрытие.

Для обеспечения гидродинамической смазки на поверхность А вращающейся втулки было предложено нанести структуру микроканалов (рис. 3).



Рис. 3. Вид на поверхность вращающейся втулки

Для равномерной подачи масла вокруг отверстия делается фаска (снимается материал на глубину 120 мкм) и выполняется специально спрофилированная структура подачи масла в кольцевую канавку глубиной 50 мкм. Кольцевая канавка переменной глубины 20 и 40 мкм служит для равномерной подачи масла в гидродинамические канавки глубиной 10 мкм. Необходимо провести численное исследование уплотнения, выбрать оптимальные его параметры, разработать технологию изготовления гидродинамических канавок, изготовить опытный образец и провести его испытание.

## Численное исследование

Для проведения численного исследования необходимо пояснить механизм функционирования предлагаемой конструкции уплотнения. Масло, попадающее под козырёк вращающейся втулки, имеет повышенное давление из-за действия центробежных сил. Под действием этого давления оно выдавливается через дросселирующие отверстия втулки в кольцевую камеру на торцевой поверхности. И далее, в том числе и под действием центробежных сил, протекает через зазор в наружную полость, то есть назад в масляную полость опоры. Это обеспечивает гидростатический принцип образования смазки в зазоре уплотнения. Величина давления масла в кольцевой канавке определяется соотношением гидравлических сопротивлений дросселирующих отверстий и зазора уплотнения. Расчётным путём выбираются такие параметры уплотнения, чтобы величина давления масла в кольцевой камере не превышала давление уплотняемого воздуха. Это исключает попадание масла в полость с уплотняемым воздухом. Для повышения гидравлической силы в щели от кольцевой камеры наружу в радиальном направлении выполняются гидродинамические канавки. Это обеспечивает генерирование гидродинамической силы в зазоре, то есть уплотнение является гибридным.

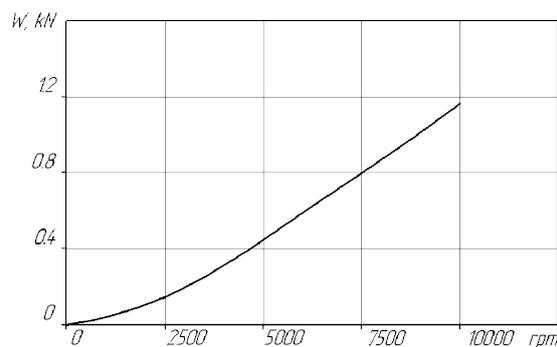


Рис. 4. Зависимость несущей способности от частоты вращения ротора

В этом случае возрастает и жёсткость смазочного слоя, что обеспечивает удовлетворительные динамические свойства уплотнения.

Размеры спроектированной микро-структуры были рассчитаны и оптимизированы с помощью метода конечных объёмов [4, 8].

Зависимость рассчитанного значения гидродинамической силы в щели для фиксированной величины зазора в зависимости от частоты вращения ротора показана на рис. 4.

Проведение такого расчётного исследования позволяет определить оптимальные параметры элементов радиально-торцового уплотнения, которые обеспечат эффективную его работу в составе опоры авиационного двигателя.

#### **Техническая реализация и экспериментальные исследования**

Изготовление канавок произведено на лазере EV15DS фирмы Telesys.

Такая технология изготовления гидродинамических канавок позволяет обеспечить требуемую их глубину с точностью 0,5 мкм. При этом шероховатость дна микроканавки составляет 0,4 мкм.

Проведены тесты на динамическом стенде, предназначенном для реализации условий эксплуатации уплотнений опор в составе авиационного двигателя. Вначале проводилась проверка работоспособности уплотнения на переходных режимах работы.

Величина утечки воздуха в масляную полость не превышала 2 г/с. После разборки узла было зафиксировано отсутствие износа уплотнительных поверхностей.

На динамическом стенде также проведены длительные испытания в условиях  $n = 8000$  об/мин,  $T_{\text{air}} = 210 \dots 230^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.3$  МПа длительностью 3 часа. При данных испытаниях также не зафиксировано наличие износа уплотнительных поверхностей графитового кольца и вращающейся втулки.

#### **Актуальные проблемы и перспективные разработки по повышению надёжности уплотнений**

Анализ патентов и разработок различных фирм показал, что идёт непрерывный поиск технических решений, позволяющих обеспечить высокие герметичность и ресурс уплотнений опор роторов двигателей. Предлагаемая концепция нового радиально-торцового уплотнения соответствует современным тенденциям развития уплотнительной техники. Оригинальное техническое решение для внедрения гидродинамической смазки в уплотнительный узел авиационного двигателя позволит повысить ресурсные показатели радиально-торцового контактного уплотнения.

Первой проблемой является необходимость обеспечения запаса надёжности узла трения при работе в условиях граничного трения. Суть проблемы сводится к тому, что часть времени (при малых скоростях скольжения в процессе запуска и остановок двигателя, а также при форсированных режимах эксплуатации) поверхности трения уплотнительного узла вынуждены работать в режиме неблагоприятного граничного трения, характеризующегося высокими значениями коэффициента трения и повреждением поверхностей в зонах фактических пятен касания. Повышение потерь на трение вызывает ускоренный нагрев поверхностей, а накопление повреждений вызывает изнашивание поверхностей трения. На практике, если не удастся применить организационные меры (сокращение количества циклов «запуск-остановка», сокращение времени на разгон и остановку), проблема граничного трения гидродинамических узлов решается за счёт конструктивно-технологических мер по обеспечению фрикционной совместимости используемых материалов по критерию устойчивости узла трения к недопустимым видам трения и катастрофическим формам изнашивания в условиях высоких температур.

Для проведения испытаний на фрикционную совместимость разработан универсальный триботехнический комплекс «Универсал-1Б» [13]. Методика испытаний включает оценку несущей способности узла трения в режиме ступенчато-возрастающей нагрузки на контакт вплоть до возникновения недопустимых видов трения и изнашивания.

Вторая проблема заключается в необходимости снижения последствий граничного трения, т.е. уменьшения скорости изнашивания поверхностей, снижения фрикционного разогрева и загрязнения уплотнительного узла продуктами разложения смазочного масла. Для этого поверхности трения должны обладать высокими антифрикционными и противозносными характеристиками, а также плохой адгезией к различным загрязнениям. Указанным комплексом свойств обладают наноструктурированные беспористые хром-алмазные покрытия. Последние исследования показали также перспективность создания покрытий с положительным градиентом механических свойств по глубине. Примером таких покрытий могут служить градиентные антифрикционные, антизадирные серебряно-алмазные покрытия, разработанные в лаборатории наноструктурированных покрытий Самарского государственного технического университета [14]. Преимущество серебряно-алмазных покрытий по сравнению с хром-алмазными заключается в том, что серебро выполняет роль твёрдой смазки при форсированных режимах нагружения, обеспечивает теплоотвод, хорошую прирабатываемость и низкий коэффициент трения. К недостаткам относятся чувствительность к содержанию серы в смазочной среде и необходимость нанесения подслоя при обработке стальных поверхностей. Повышение микротвёрдости материала покрытия по мере приближения к основному металлу обеспечивается за счёт управления размерами зёрен путём ступенчатого изменения режимов рабочего асимметричного переменного тока при осаждении покрытий из электролитов, со-

держающих ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Дальнейшее повышение эксплуатационных свойств поверхностей трения может быть связано с использованием технологии диффузионного молекулярного армирования [15], в которой поверхностный слой упрочняется за счёт внедрения в него фрагментов молекул радикалообразующей жидкости. Данный процесс связан с уменьшением свободной энергии металлической поверхности, что обеспечивает её пассивацию. Мероприятия по повышению стойкости поверхностей трения к изнашиванию, безусловно, должны рассматриваться в совокупности с мерами по снижению уровня разрушающих воздействий, включая снижение тепловых нагрузок, предотвращению появления концентраторов напряжений в стыке, уменьшению уровня удельных статических и динамических нагрузок на поверхности трения. Последнее особенно важно учитывать при создании узлов трения для высокооборотной техники. В случае возбуждения в стыке резонансных частот будет наблюдаться аномальное снижение трения, сопровождаемое, тем не менее, повышенным износом поверхностей трения.

Третья проблема заключается в необходимости подачи в уплотнительный узел смазочного масла с гарантированными показателями качества. До сих пор в авиационном двигателестроении основное внимание уделялось только одному параметру качества – чистоте масла, которую можно контролировать при помощи известных устройств («Фотон», АЗЖ-955 и др.) [16] и поддерживать на необходимом уровне методом фильтрации (в этом направлении актуальными являются разработки эффективных компактных динамических фильтров). Однако данную проблему следует рассматривать несколько шире. При всей важности отсутствия механических примесей в масле главными параметрами состояния масла являются антифрикционные свойства (коэффициент трения, момент трения), антизадирные свойства (несущая способность) и вяз-

кость, которые указывают на способность масла защищать поверхности трения как в условиях граничного, так и жидкостного трения. Если в масле (даже очищенном от загрязнений) будет наблюдаться дефицит и тем более отсутствие антифрикционных и антизадирных присадок, то в условиях эксплуатации может произойти разрыв масляной плёнки с резким увеличением коэффициента трения и, как следствие, перегревом и закоксовыванием поверхностей трения. Учитывая, что данные присадки в процессе эксплуатации масла постепенно вырабатываются, то непрерывный контроль масла по всем значимым параметрам становится необходимым условием обеспечения работоспособности уплотнения. Для решения данной проблемы разработаны новые способ и устройство для оперативного контроля качества смазочных масел, используемых в двигателях [17]. Диагностическое устройство содержит модули оценки степени загрязнения масла, антифрикционных свойств, антизадирных свойств, температуры и вязкости. По полученным характеристикам делают заключение о пригодности масла к дальнейшему использованию.

### Выводы

Создание авиационных двигателей нового поколения невозможно без обес-

печения надёжной работы радиально-торцовых контактных уплотнений в условиях высоких давлений и температур. Установлено, что высокую эффективность уплотнения обеспечивает гидродинамический слой масла, создаваемый за счёт формирования специального профиля (в виде кольцевой канавки переменной глубины) на поверхности трения подвижной втулки. Для этого разработана методика расчёта геометрии канавки, а также освоена лазерная технология её получения.

На основе построения и анализа схемы развития процесса повреждаемости существующей конструкции уплотнительного узла предложен комплекс перспективных разработок, в которых заложен потенциал дальнейшего совершенствования уплотнения, включая создание оборудования для проведения триботехнических испытаний на фрикционную совместимость, нанесение на рабочие поверхности наноструктурированных градиентных противоизносных антифрикционных покрытий, а также разработку средств оперативной диагностики качества масла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

### Библиографический список

1. Steinetz B.M., Hendricks R.C., Munson J. Advanced seal technology role in meeting next generation turbine engine goals // NASA/TM-1998-206961, 1998.
2. Zhdanov I., Staudacher S., Falaleev S. An advanced usage of meanline loss systems for axial turbine design optimisation // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2013. V. 6A. doi: 10.1115/GT2013-94323.
3. Vinogradov A.S. Seal design features for systems and units of aviation engines // Life Science Journal. 2014. V. 11, Iss. 8. P. 575-580.
4. Lebeck A. Principles and Design of Mechanical Face Seals. John Wiley & Son, Inc., NY, 1991.
5. Lebeck A. How much do we know about mechanical seals? // Sealing Technology. 2006. Iss. 9. P. 11-12. doi: 10.1016/S1350-4789(06)71357-5
6. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиа-двигатель, 2006. 1204 с.
7. Belousov A.I., Falaleev S.V., Vinogradov A.S., Bondarchuk P.V. Problems of application of face gasodynamic seals in aircraft engines // Russian Aeronautics. 2007.

V. 50, Iss. 4. P. 390-394. doi: 10.3103/S1068799807040083

8. Belousov A.I., Falaleev S.V., Demura A.S. On application of the theory of face seals with microgrooves to high-speed FV engine rotors // Russian Aeronautic. 2009. V. 52, Iss. 3. P. 335-339. doi: 10.3103/S106879980903012X.

9. Müller H.K., Nau B.S. Fluid Sealing Technology: Principles and Applications. M. Dekker Inc., New York, 1998. 485 p.

10. Falaleev S.V. Hydrodynamic characteristics of the face seal taking into account lubricant film breakdown, inertial forces and complex clearance form // Life Science Journal. 2014. V. 11, Iss. 9. P. 337-343.

11. Lebeck A. Experiments and modeling of zero leakage backward pumping mechanical face seals // Tribology Transactions. 2008. V. 51, Iss. 4. P. 389-395. doi.org/10.1080/10402000802121650

12. Handbook of Lubrication and Tribology. V. 2. Theory and Design, Second Edition / ed. by R.W. Bruce. CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 1169 p.

13. Ибатуллин И.Д. Триботехнические испытания на фрикционную совместимость. Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. 217 с.

14. Gallyamov A.R., Ibatullin I.D. New technology, properties and application of nanostructured antifriction electrochemical coatings // Life Science Journal. 2014. V. 11, Iss. 12s. P. 586-591.

15. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Самарский государственный технический университет, 2008. 387 с.

16. Логвинов Л.М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости: уч. пособие. М.: ЦНТИ «Поиск», 1992. 90 с.

17. Ненашев М.В., Ибатуллин И.Д., Марков А.С., Марков В.С., Емельянов С.Г. Диагностическая система для контроля качества моторных масел // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 1(2). С. 464-467.

### Информация об авторах

**Фалалеев Сергей Викторинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Область научных интересов: конструкция авиационных двигателей и их систем, разработка уплотнений с газовой и жидкостной смазкой.

**Бондарчук Петр Владимирович**, ассистент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Область научных интересов: гермотехника и расчёты на прочность.

**Ибатуллин Ильдар Дугласович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Самарский государственный технический университет. E-mail: [tribo@rambler.ru](mailto:tribo@rambler.ru). Область научных интересов: трибология, методы и приборы контроля качества поверхностей, гальванические и детонационные покрытия, механика разрушения твёрдых тел.

**Бадыков Ренат Раисович**, ассистент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Область научных интересов: торцовые уплотнения, конструкция авиационных двигателей.

## IMPROVING THE RELIABILITY OF RADIAL FACE SEALS OF AIRCRAFT ENGINE ROTOR SUPPORTS

© 2015 S. V. Falaleev<sup>1</sup>, P. V. Bondarchuk<sup>1</sup>, I. D. Ibatullin<sup>2</sup>, R. R. Badykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

The article presents an advanced radial face contact seal with increased operational life. High efficiency of the radial mechanical seal is ensured by the joint application of the hydrostatic and hydrodynamic lubrication principles. The hydrodynamic effect is achieved by applying the structure of fine grooves on the rotor hub. The dependence of the flow force value in the slot for a fixed-size gap on the rotor speed is presented. A prototype has been made and tested on a dynamic test bed intended for the realization of operating conditions of support seals making up a part of an aircraft engine. The results of theoretical and experimental studies are presented. Ways of improving the seal reliability due to improving the surface mechanical properties are proposed. A pattern of the development of a functional failure of the seal assembly is presented. The most adverse operating conditions and the main reasons of increased wear of the sealing surfaces are indicated. Methods of achieving high anti-friction characteristics of contact surfaces by applying nanostructured nonporous chrome-diamond coatings are proposed. Issues concerning the creation of advanced coatings with a positive gradient of depth mechanical properties are discussed. Anti-friction, anti-seize silver-diamond coatings and the use of diffusion molecular reinforcement technology are at the basis of the production of advanced coatings. The paper indicates the importance of anti-friction and extreme-pressure additives contained in the oil.

*Radial face contact mechanical seal, hydrodynamic grooves, leaks, resource, protective coating.*

### References

1. Steinetz B.M., Hendricks R.C., Munson J. Advanced seal technology role in meeting next generation turbine engine goals. *NASA/TM—1998-206961*, 1998.
2. Zhdanov I., Staudacher S., Falaleev S. An advanced usage of meanline loss systems for axial turbine design optimisation. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2013. V. 6 A. doi: 10.1115/GT2013-94323.
3. Vinogradov A.S. Seal design features for systems and units of aviation engines. *Life Science Journal*. 2014. V. 11, Iss. 8. P. 575-580.
4. Lebeck A. Principles and Design of Mechanical Face Seals. John Wiley & Son, Inc., NY, 1991.
5. Lebeck A. How much do we know about mechanical seals. *Sealing Technology*. 2006. Iss. 9. P. 11-12. doi: 10.1016/S1350-4789(06)71357-5
6. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. *Gazoturbinnyye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm: Aviadvigatel' Publ., 2006. 1204 p.
7. Belousov A.I., Falaleev S.V., Vinogradov A.S., Bondarchuk P.V. Problems of application of face gasodynamic seals in aircraft engines. *Russian Aeronautics*. 2007. V. 50, Iss. 4. P. 390-394. doi: 10.3103/S1068799807040083
8. Belousov A.I., Falaleev S.V., Demura A.S. On application of the theory of face seals with microgrooves to high-speed FV engine rotors. *Russian Aeronautics*. 2009. V. 52, Iss. 3. P. 335-339. doi: 10.3103/S106879980903012X.
9. Müller H.K., Nau B.S. Fluid Sealing Technology: Principles and Applications. M. Dekker Inc., New York, 1998. 485 p.
10. Falaleev S.V. Hydrodynamic characteristics of the face seal taking into account lubricant film breakdown, inertial forces and complex clearance form. *Life Science Journal*. 2014. V. 11, Iss. 9. P. 337-343.
11. Lebeck A. Experiments and modeling of zero leakage backward pumping mechanical face seals. *Tribology Transactions*. 2008. V. 51, Iss. 4. P. 389-395. doi.org/10.1080/10402000802121650
12. Handbook of Lubrication and Tribology. V. 2. Theory and Design, Second Edition.

tion / ed. by R.W. Bruce. CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 1169 p.

13. Ibatullin I.D. *Tribotekhnicheskie ispytaniya na friktsionnuyu sovmestimost'* [Friction compatibility tribotechnical tests]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2014. 217 p.

14. Gallyamov A.R., Ibatullin I.D. New technology, properties and application of nanostructured antifriction electrochemical coatings. *Life Science Journal*. 2014. V. 11, Iss. 12s. P. 586-591.

15. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev* [Kinetics of fatigue damage and fracture of surface layers: monograph]. Sa-

mara: Samara State Technical University Publ., 2008. 387 p.

16. Logvinov L.M. *Tekhnicheskaya diagnostika zhidkostnykh sistem tekhnologicheskogo oborudovaniya po parametram rabochey zhidkosti* [Technical diagnostics of process equipment fluid systems by the parameters of the working fluid: study guide]. Moscow: CSTI «Poisk» Publ., 1992. 90 p.

17. Nenashev M.V., Ibatullin I.D., Markov A.S., Markov V.S. Emelyanov S.G. Diagnostic system for engine oils quality control // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2014. V. 16, no. 1(2). P. 464-467. (In Russ.)

### About the authors

**Falaleev Sergey Victorinovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Area of Research: design of aircraft engines and systems, development of gas and liquid-lubricated seals.

**Bondarchuk Pyotr Vladimirovich**, assistant of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Area of Research: air tightness and strength calculations.

**Ibatullin Ildar Duglasovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor of Samara State Technical University, Samara, Russian Federation. E-mail: [tribo@rambler.ru](mailto:tribo@rambler.ru). Area of Research: tribology, methods and devices of controlling the quality of surfaces, galvanic and detonation coatings, solid-body fracture mechanics.

**Badykov Renat Raisovich**, assistant of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [kipdla@ssau.ru](mailto:kipdla@ssau.ru). Area of Research: end seal system, aircraft engine design.