

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РЕСУРСА И НАДЁЖНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ГТД

©2009 Д. Г. Громаковский, А. Г. Ковшов, И. Д. Ибатуллин

Самарский государственный технический университет

Приведены результаты разработки совокупности технических решений для обеспечения высокой долговечности узлов трения газотурбинных двигателей: расчетные модели для прогнозирования изнашивания пар трения, новый склерометрический метод и устройство для оценки активационных параметров деформации и разрушения поверхностных слоев, методы упрочняющей обработки покрытий, уплотнений, деталей пар трения и др.

Надёжность, узлы трения, газотурбинный двигатель, склерометрия, модель изнашивания, присадка, упрочняющее деформационное формоизменение

Создание высоконадежной авиационной техники на современном уровне качества требует использования системных решений, обеспечивающих оптимизацию конструкции, отработку методов доводки, испытаний и др. конструктивных и технологических процедур.

Для узлов трения системный подход обычно предполагает выбор и оценку совместимости материалов, применения расчетных и экспериментальных методов прогнозирования изнашивания, подбор режимов упрочнения, термообработки, покрытий, смазочных материалов и т.п.

В НТЦ «Надёжность» СамГТУ разработан ряд технических решений, способствующих обеспечению современного уровня качества узлов трения ГТД, уменьшающих изнашивание деталей, выход из строя агрегатов и систем, нарушения работоспособности, ухудшение эксплуатационных параметров.

Для этапа проектирования предложен расчетный способ прогнозирования ожидаемой износостойкости, основанный на термофлуктуационной кинетической концепции, учитывающий накопление повреждаемости, вызываемой трением.

В разработке, согласно кинетической концепции [1,2] и др., разрушение поверхностей рассматривается как результат двух противоположно направленных процессов: во-первых, роста плотности потенциальной (скрытой) энергии повреждений, образуемых работой внешних сил W_p в поверхностных слоях, а во-вторых, их релаксацией.

При построении физических и расчетных моделей [3] и др. использовано явление, отмеченное в работах Е.А. Марченко, В.Г. Пинчука, А. Белла и др., в котором изнашивание протекает в форме кинетических циклов «накопление повреждений – разрушение», что происходит на площадках фактического контакта.

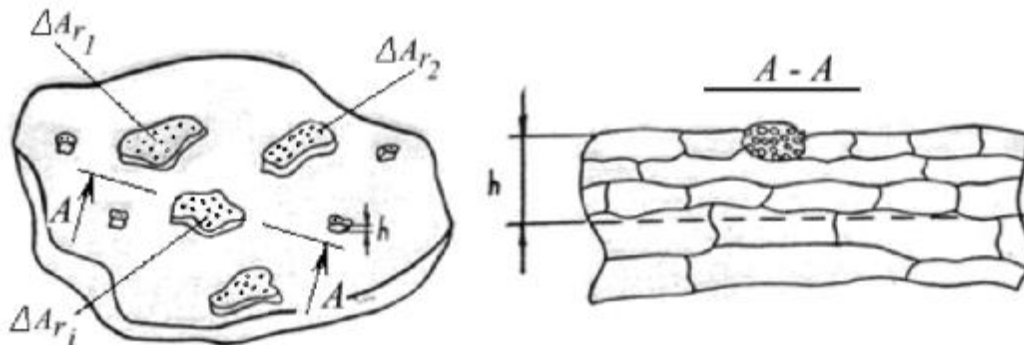


Рис.1. Схема разрушения

Накопление повреждений структуры, рис.1а, локализуется в микрообъемах V_d материала, ограниченного площадью суммы

поверхностей фактического контакта - ΣA_r и глубиной h .

Микрообъем материала, рис. 1б, разрушаемого за один кинетический цикл - V_d :

$$V_d = \Delta A_r \cdot n_r \cdot h, \text{ мм}^2, \quad (1)$$

где ΔA_r - средняя площадь единичного пятна фактического контакта; n_r - расчетное число пятен фактического контакта; h - толщина слоя материала, разрушаемого за 1 кинематический цикл.

Для описания элементарного акта разрушения использованы представления кинетической термофлуктуационной теории прочности, в которой долговечность τ (время существования единичной связи под нагрузкой) определяется известным уравнением акад. С.Н. Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \text{ с}, \quad (2)$$

где τ_0 - временная постоянная (частота колебаний атома в межузлиях кристаллической решетки $\tau_0 \sim 10^{-12}$ с); U_0 - энергия активации разрушения единичной связи; γ - структурно-чувствительный параметр; σ - действующее напряжение; k - постоянная Больцмана; T - температура.

Общее число связей - λ , разрушающихся в каждом микрообъеме V_d материала за один кинематический цикл, оценивали ги-

потетически, с помощью ряда принятых упрощений.

Общее время T разрушения микрообъема материала V_d :

$$T_u = \tau \cdot \lambda \cdot \rho, \text{ с}, \quad (3)$$

где λ - количество одновременно разрушаемых единичных связей.

Изнашивание в расчетной модели измеряется средней скоростью диспергирования локализованного поверхностного микрообъема материала за время одного цикла T_u :

$$J_v = \frac{V_d}{T_u}, \text{ мм}^3/\text{ч}. \quad (4)$$

С учетом требований размерности, соотношений (1 - 4), характеристики релаксации повреждений θ исходной повреждаемости ξ материала, а также диссипативности контакта (коэффициент поглощения - ψ) отношение (4) представлено в виде

$$J_v = \frac{\Delta A_r \cdot n_r \cdot h}{\Pi_p \cdot \xi \cdot \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \psi \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)}, \text{ мм}^3/\text{ч}, \quad (5)$$

где R - универсальная газовая постоянная. Пример реализации данной методики приведен на рис.2, где оценен износ бронзовой втулки шлиц-шарнира шасси самолета.

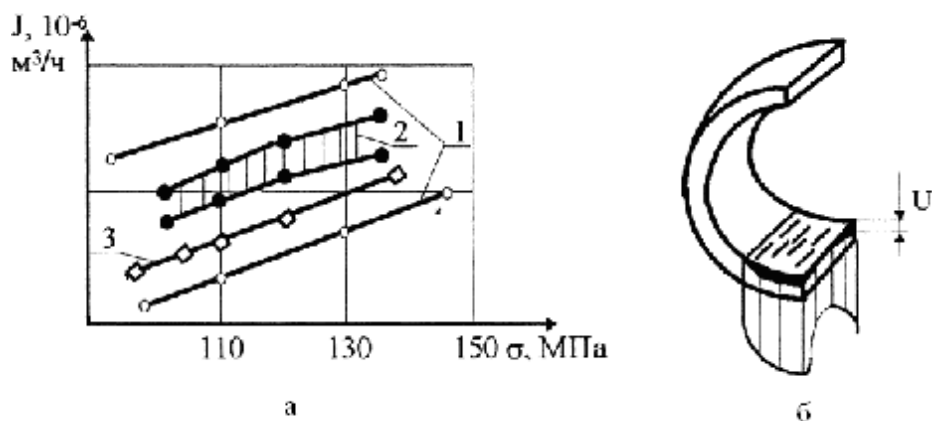


Рис.2. Результаты расчета: а - кривая зависимости величины износа (1- по данным эксплуатации, 2- результаты стеновых испытаний, 3- расчетная кривая); б- общий вид эюры износа

Для оценки расчетных параметров в предложенных уравнениях создан склерометрический программно-аппаратурный комплекс (патенты РФ 2277232, 22821774, 2119165), с помощью которого определяют удельную энергию пластической деформации $U_{y\partial}$ и на копленную энергию повреждаемости $U_e = A/W$, где A - работа дефор-

мации, кДж; W - объём деформируемого материала, моль, что необходимо для прогнозирования износостойкости и остаточного ресурса. Лабораторный образец комплекса и методика оценки объёма деформации при склерометрировании показаны на рис. 3.

Пример прогнозирования остаточного ресурса приведён на рис.4.

В системе мероприятий обеспечивающих высокую долговечность узлов трения, предложен технологический способ упрочняющего деформационного изменения поверхностей трения (патенты РФ 9444896,1058765,1044518, 2198954, 1838447, 2001108024,2138549) и др., в котором мето-

дом обката и копирования формы гравюры упрочняющего ролика создается регулярный рельеф гексагонального типа. Способ апробирован на замках и бандажных полках лопаток компрессоров на Казанском моторном заводе как средство, предотвращающее фреттинг-коррозию.

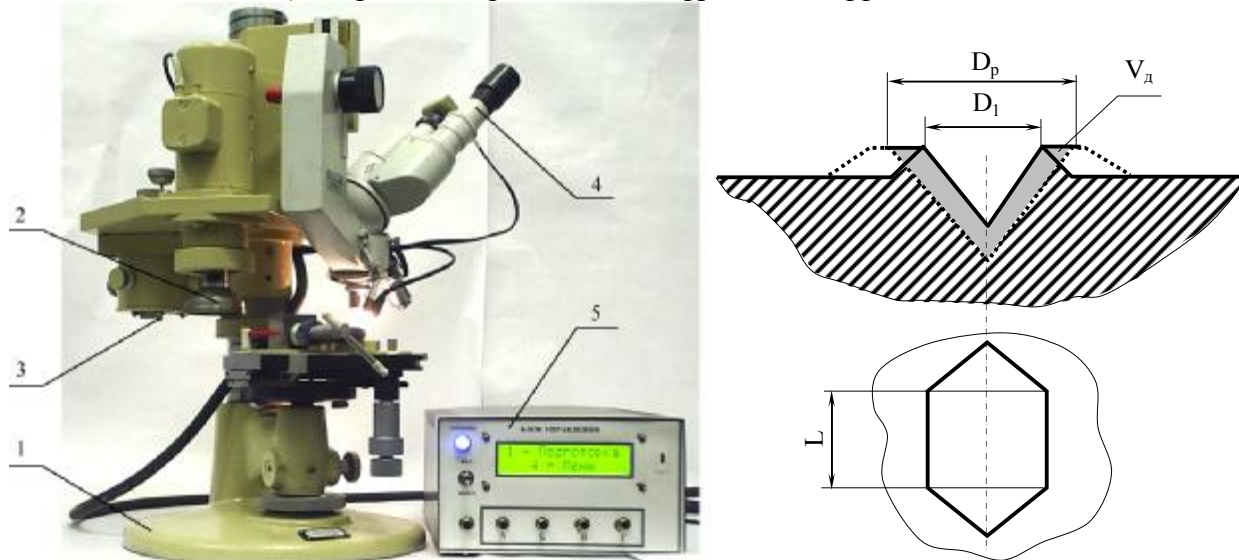


Рис.3. Лабораторный вариант склерометрического комплекса - а и иллюстрация методики оценки удельной энергии деформации при царапании - б. 1 – основание, 2 – блок подготовки шлифа, 3 – склерометрический узел, 4 – оптикоэлектронный блок, 4 – блок сбора данных и обработки информации, L – длина царапины, D_1 и D_p – ширина борозды (пунктиром показан вид борозды после нескольких проходов индентора). V_d – активируемый объём материала поверхностного слоя (выделен тёмным цветом)

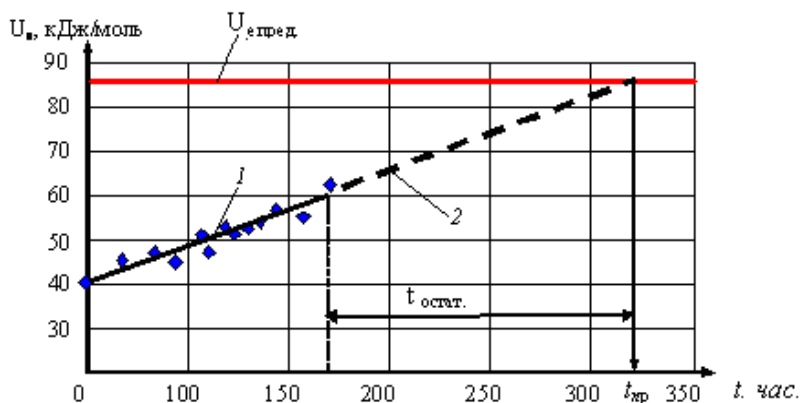


Рис. 4. Пример прогнозирования остаточного ресурса: 1 – участок графика накопления повреждаемости, построенный по экспериментальным данным; 2 – экстраполяция экспериментальных данных; $t_{пр}$ – время исчерпания остаточного ресурса; $t_{остат}$ – остаточный ресурс

Деформационное упрочняющее формоизменение производится внедрением в поверхность клиновидных, сферических и иных инденторов, создающих заданную конфигурацию рельефа поверхности трения.

Технологические варианты обработки поверхностей деталей машин приведены на рис.5.

Этот способ в 1994г. отмечен серебряной медалью на Брюссельской международной ярмарке и подтвержден АС СССР и патентами РФ 2017802, 2027749, 14998052, 1309666, 1998052, 187784, 1030401, 1011674 и 7775502.

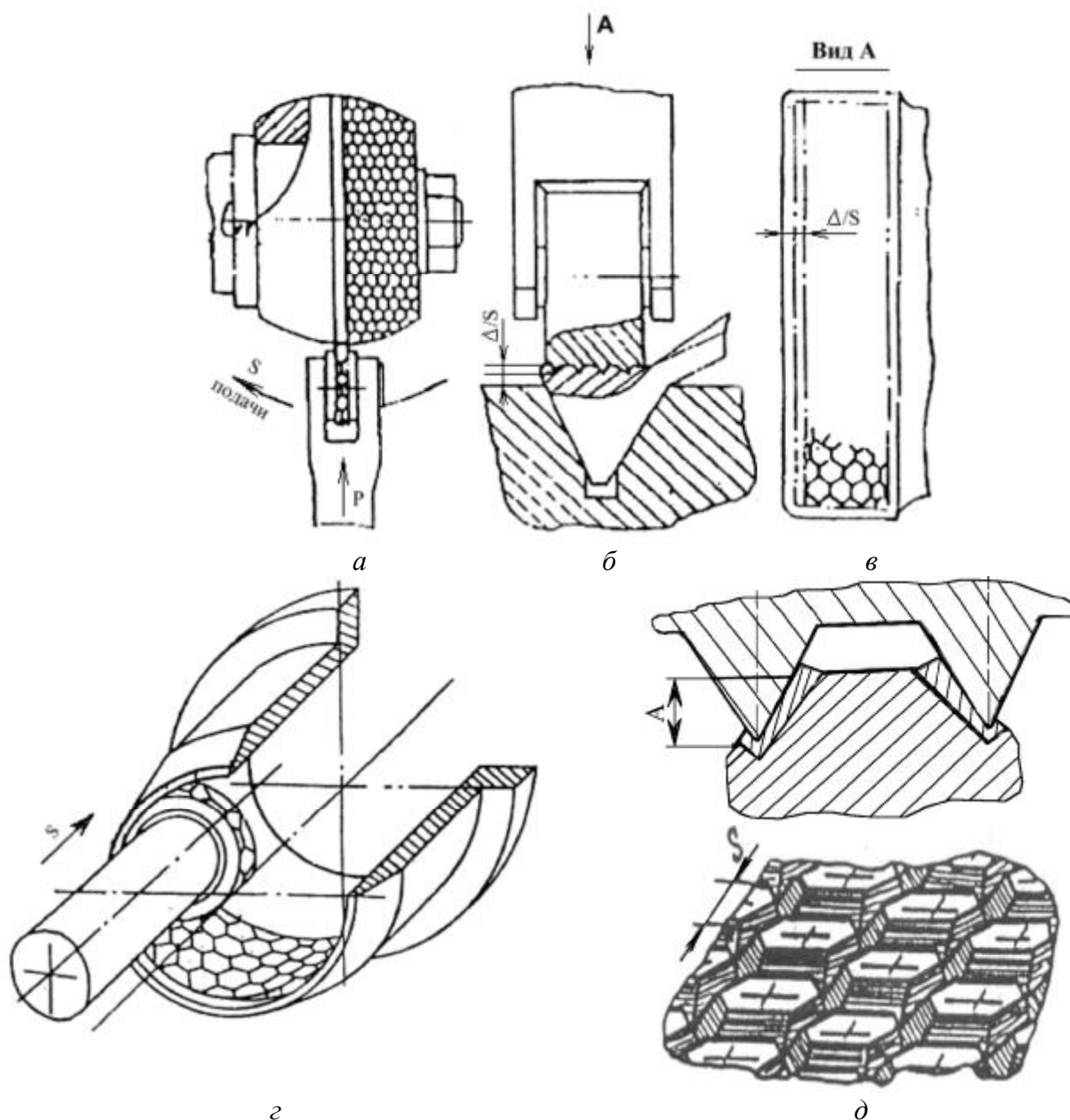


Рис.5. Варианты обработки (а,б,в,г) и схема рельефа (д)

Наряду с механическим упрочнением высокая эффективность получена при инактивации поверхностей с помощью карбонофторидов типа $(Cf_x)_n$.

Воздействие присадки проявляется в образовании на поверхности трения защитных слоёв фторидов железа, что показано на рис.6.

Высокая эффективность присадки при стендовых испытаниях ГТД на СНТК им. Н.Д.Кузнецова была продемонстрирована при работе двигателя, в котором масло (МС-8п) было заменено дизельным топливом с добавкой присадки фторированного графита.

Двигатель проработал на стенде 1480 часов без замечаний.

Аналогичный эксперимент был проведён на газоперекачивающей станции «Карпинская» - штатное масло было заменено бесприсадочным маслом МС-8 с присадкой фторированного графита.

Двигатель и установка проработали безотказно 6 лет до капитального ремонта.

При разборке узлы трения не имели обычных износов.

Существенный эффект достигается при применении нового способа диффузионного молекулярного армирования (Патент РФ № 2198954). Упрочнение здесь обеспечивает

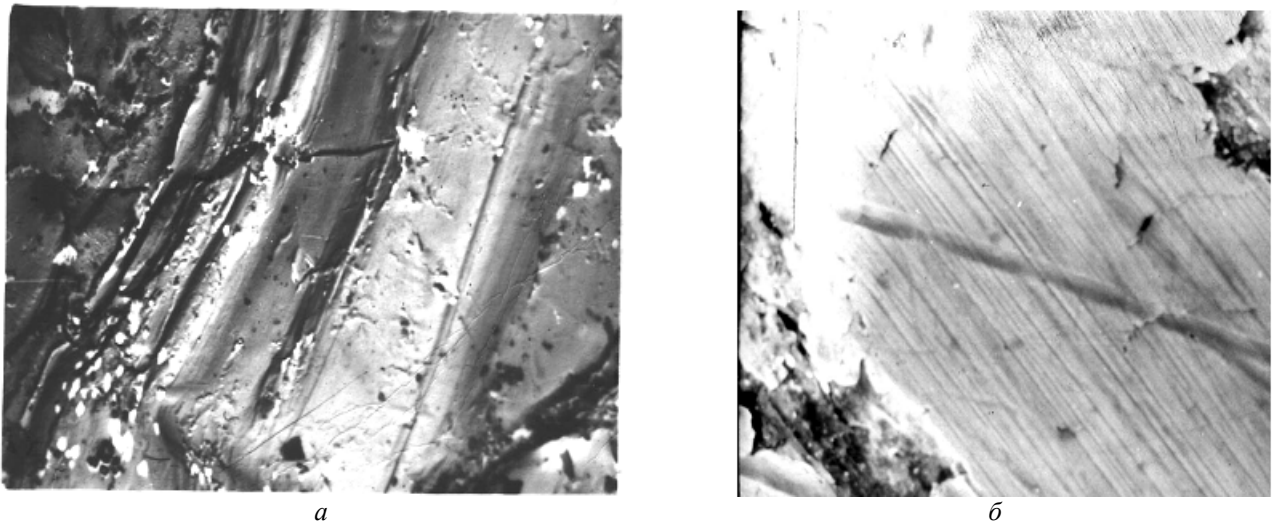


Рис.6. Изменения поверхности трения под действием присадки ($\times 10000$):
 а – исходная поверхность; б – на поверхности трения образована пленка фторидов железа FeF_3

диффузионное внедрение активных органических молекул вглубь металла по выходам на поверхность дефектов кристаллической решетки, что приводит к образованию модифицированного (пассивированного) слоя, «прошитого» прочными цепочками химически связанных атомов, выполняющими роль «арматуры» в металлической решетке (рис.7).

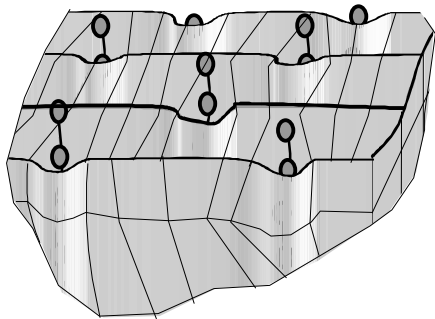


Рис.7. Схема пассивации поверхностных дефектов

Положительные результаты повышения износостойкости получены при использовании олигодиметилсилоксановых жидкостей в новом способе мультислойной смазки (патент РФ 2334909), а также при введении этой жидкости в слоистые амортизаторы между плоскими пластинами, как это показано на рис.8 и при введении подслоя смазки между металлической поверхностью и смазочным слоем, в подшипниках, рис.9.

Высокая износостойкость изношенных деталей достигнута в новом способе электролитического железнения при трении, патент РФ № 2292410, рис.10.

Электролитическое покрытие в данном способе производится при непрерывном натирании покрываемой поверхности, что создаёт ряд положительных эффектов.

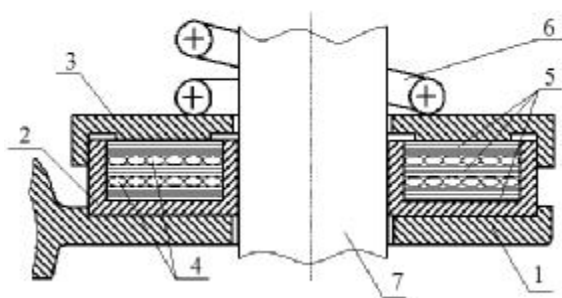


Рис.8. Устройство пластинчатого амортизатора и исполнение единичной пластины с нанесённым слоем олигодиметилсилоксановой жидкости

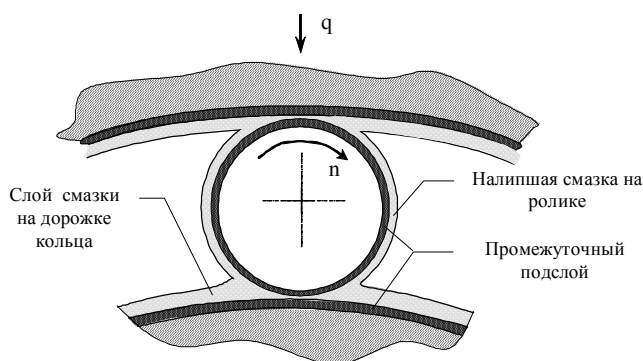


Рис.9. Структура промежуточного подслоя в роликовом подшипнике качения

Для приготовления основного электролита используются дешевые и недефицитные - соляная кислота и растворимые аноды из малоуглеродистых сталей - марок (Ст0... Ст3); выход металла по току (85...95%) в 5...10 раз больше, чем при хромировании; скорость наращивания покрытия достигает до 1,6 мм/ч на диаметр, скорость хромирования 0,02...0,10 мм/ч.

Толщина наращиваемого слоя может быть получена до 2мм. Расход электроэнергии на покрытие средней толщины ($h = 0,5\text{мм}$) составляет 0,4 кВт ч/дм², что многократно меньше, чем при хромировании.



Рис.10. Фото установки для нанесения покрытий на посадочные поверхности крупногабаритных подшипников

Электролиз производится при комнатной температуре (вместо 85...90°C) без промежуточных промывок перед операцией «травление». Покрытия хорошо цементируются и азотируются.

Прочность сцепления покрытия со сталью достигает 45...50 кгс/мм², что обеспечивает надежную работу деталей в самых тя-

желых условиях эксплуатации. Твердость – до 62...64 HRC.

Для повышения эффективности очистки деталей узлов трения, созданы (патенты РФ № 1734886 и 20024336) моечные установки, основанные на возбуждении низкочастотной кавитации моющей среды в емкостях или в струях моющей жидкости.

На рис.11 приведена схема установки, внедрённой в цех №2 СНТК им. Н.Д. Кузнецова для мойки деталей погружением в кавитирующую жидкость. На рис.12 кавитация реализуется в струях моющей жидкости. Данная установка внедрена на Куйбышевской железной дороге для промывки буксовых подшипников.

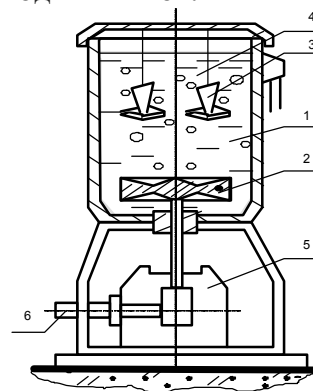


Рис. 11. Установка для промывки деталей ГТД погружением в кавитирующую жидкость: 1-жидкость; 2-активатор ($f \approx 120 \text{ Гц}$); 3 и 4 – промываемые детали; 5- привод пульсации жидкости

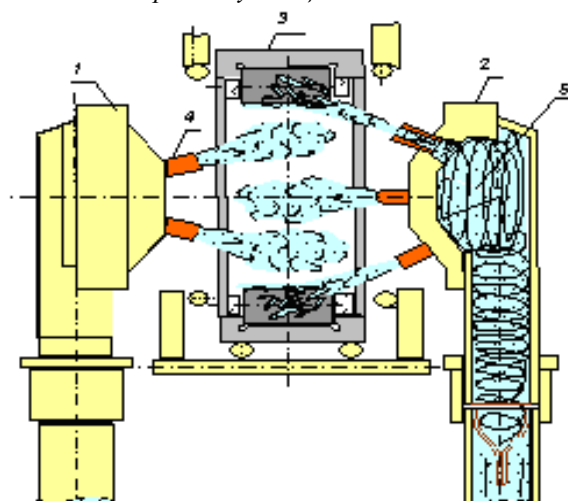


Рис.12. Установка для промывки буксовых подшипников: 1, 2 – струйно - кавитационные головки; 3 – промываемый подшипник; 4 – сопла; 5 – кавитатор

Согласно патенту РФ №2176044 созданы управляемые торцевые уплотнения,

обеспечивающие автоматическое поддержание заданного торцевого зазора, рис. 13.

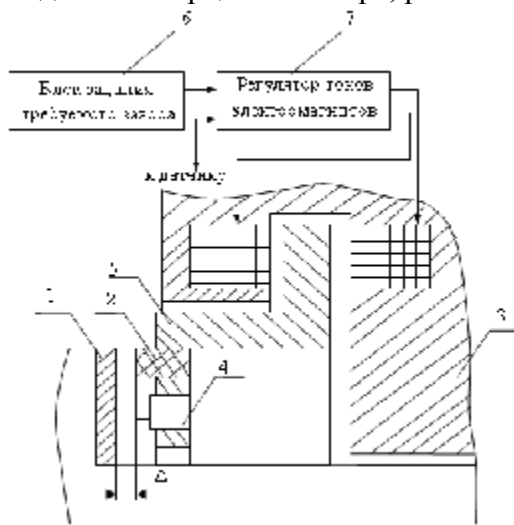


Рис.13. Схема управляемого электромагнитного торцевого уплотнения: 1- вращающееся кольцо уплотнения на роторе; 2 - невращающееся кольцо, установленное на корпусе - 3; 4- датчик для контроля величины зазора; 5- якорь электромагнитной системы; 6 и 7 система автоматического поддержания установленного зазора

Указанные разработки могут найти применение при разработке и производстве высокоэффективных газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. Журков, С.Н. Проблемы прочности твердых тел/ С.Н. Журков// Вестн. АН СССР. – 1957.- №11.-С.78-82.
2. Громаковский, Д.Г. Разработка кинетической модели изнашивания поверхностей при трении/ Д.Г. Громаковский // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1993. - №6. - С.28-33.
3. Федоров, В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел/ В.В.Федоров.- Ташкент: Изд-во ФАН УзССР, 1979.- 526с.

References

1. Gromakovsky D.G. Development of kinetic model of wear process of surfaces on friction. // Problems of mechanical engineering and automation. 1993, №6, - p.28-33.
2. Zhurkov S.N. Problem of durability of solid materials// Bulletin RAS USSR, 1957, №11,-p.78-82.
3. Feodors V.V. Thermodynamic aspects of durability and destruction of solids. Tashkent; FAN UzSsSr, 1979.-526p.

WORKING OUT THE SYSTEM OF TECHNICAL DECISIONS FOR ENSURING THE RELIABILITY OF FRICTION UNITS OF GAS-TURBINE ENGINES

©2009 D. G. Gromakovsky, A. G. Kovshov, I. D. Ibatullin

Samara State Technical University

Results of working out of system of technical decisions for ensuring the high quality of friction units of gas-turbine engines are described in the report, including the model for calculating the wear resistance of friction units, new scratching method and tester for estimating the activation parameters of deformation and destruction of surface layers, methods of hardening the details of friction pairs and other offers.

Reliability, durability, Gas Turbine Engines, scratching, molecular reinforcing, deformation hardening, additives, calculation of wear process

Информация об авторах

Громаковский Дмитрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор Самарского государственного технического университета, директор НТЦ «Надёжность». E-mail: pnms3@mail.ru. Область научных интересов: физика прочности, трибология.

Ковшов Анатолий Гаврилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Самарского государственного технического университета. E-mail: pnms3@mail.ru. Область научных интересов: физика прочности, трибология.

Ибатуллин Ильдар Дугласович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Самарского государственного технического университета. E-mail: tribo@rambler.ru. Область научных интересов: физика прочности, трибология.

Gromakovsky Dmitry Grigorjevich, Doctor of Engineering Science, professor., director of scientific and technological centre “Reliability”, Samara State Technical University. E-mail: pnms3@mail.ru. Area of research: physics of durability, tribology.

Kovshov Anatoly Gavrilovich, Candidate of Engineering Science, the senior lecturer of the chair “Technology of mechanical engineering”, Samara State Technical University. E-mail: pnms3@mail.ru. Area of research: physics of durability, tribology.

Ibatullin Ildar Duglasovich, Candidate of Engineering Science, the senior lecturer of the chair “Technology of mechanical engineering”, Samara State Technical University. E-mail: tribo@rambler.ru. Area of research: physics of durability, tribology.