

## **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

© 2012 Д. Г. Громаковский<sup>1</sup>, А. Г. Ковшов<sup>1</sup>, Е. П. Кочеров<sup>2</sup>, М. В. Макарьянц<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара

<sup>3</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассмотрены способы, обеспечивающие повышение износостойкости, снижение уровня шума и вибрации. Предложенные технологии связаны с образованием фторсодержащих микроразмерных плёнок, повышающих износостойкость, контактную усталость и прочность соединения смазочного слоя с поверхностями трения; микроармированием поверхностных дефектов, замедляющим развитие усталостных повреждений; эффектом мультисмазки, повышающим нагрузочные характеристики смазочного слоя и его поглощающую способность.

*Двигатель, газогенератор, турбостартёр, деталь, поверхность, трение, износ, технология, вибрация, смазка, мультисмазка, фторирование, микроармирование.*

Практическая цель выполнения научно-исследовательской работы состояла в разработке технологических способов упрочнения поверхностей, снижения и стабилизации трения и износа, а также повышения ресурса узлов трения газотурбинных двигателей. Оценка эффективности применения разработанных технологий проведена в процессе лабораторных и совмещённых предъявительских и приёмодаточных испытаниях на базе унифицированного газогенератора.

Задачи разрабатываемых способов включали разработку трёх технологий: образования на поверхностях трения фторсодержащих нано – микро – размерных антифрикционных противоизносных структур; технологии диффузионного молекулярного армирования поверхностей трения деталей и технологии мультислойной смазки [1-5].

Объектами первичного применения и апробации разработанных технологий являлись: роликовые и шариковые подшипники качения компрессора, свободной турбины и редуктора, а также зубчатые колёса планетарного редуктора турбостартера ТС-12М.

Обеспечение низкого уровня трения, износа и контактной усталости поверхностей трения деталей в аэрокосмической технике усложняется наличием высоких

нагрузок, скоростей, разреженностью или отсутствием атмосферы, затруднениями или невозможностью применения смазок.

Одной из разрабатываемых технологий, учитывающей указанные особенности изнашивания, является образование на поверхностях трения защитных фторсодержащих плёнок [3].

Фторсодержащие плёнки образуются при физико-химическом взаимодействии материала поверхностей с микрочастицами фторированного графита  $(CF_x)_n$ , введёнными в виде присадки в смазку или приработочную жидкость. Под действием трения частицы фторированного графита разрушаются, обнажаются связи, несущие свободные атомы фтора, которые химически реагируют с металлическими, например, стальными поверхностями, и образуют эластичный слой фторидов железа  $FeF_3$ , существенно отличающийся по свойствам от свойств исходной поверхности. Поверхности трения при этом становятся более гладкими и прочными, выдерживают большее число циклов нагружения до наступления выкрашивания, адсорбируют смазку и отталкивают влагу – источник водорода, разрушающего поверхность.

Эффективность новой технологии обусловлена высокой термической стабильностью и долговечностью плёнок  $(CF_x)_n$  по сравнению с оксидами и другими антифрикционными плёнками.

После взаимодействия частиц  $(CF_x)_n$  с металлами на поверхности образуется слой фторидов, например  $FeF_3$ , имеющих зеркальный вид, шероховатость на порядок ниже, чем у оксидов, более высокую микротвёрдость и в 1,2-1,5 раза большую контактную выносливость. Поверхность приобретает гидрофобность и высокую хемосорбционную способность.

Технология образования фторсодержащих защитных плёнок прошла успешные лабораторные и эксплуатационные испытания на авиационных газотурбинных двигателях, автотранспортных двигателях внутреннего сгорания, газомоторных компрессорах, в приводах и шпинделях металлорежущих станков.

Технологический процесс реализуется при обкатке пар трения, когда в обкаточную жидкость вводят 1...5 % порошка карбонофторида.

Обкатку узлов трения проводят вначале без нагрузки, а затем при номинальной частоте вращения и нагрузке. Качество обкатки обеспечивается контролем момента трения, микротвёрдости, шероховатости, температуры разогрева поверхностей, энергии активации (методом склерометрии), параметров, износа.

Время обкатки уточняется для каждого узла трения и составляет от 5÷10 мин до 0,5 ч.

Для номенклатуры деталей узлов трения редуктора турбостартёра ТС-12М рекомендована обработка во фторсодержащих приработочных жидкостях подшипников и зубчатых колёс (табл.1).

Обкатку подшипников проводили вне изделия (в лабораторных условиях) на машине трения МИ-1М по схеме, приведённой на рис.1. Режимы обкатки: частота вращения шпинделя  $n_{шп} \approx 300...350 \text{ мин}^{-1}$ ; радиальная нагрузка  $P \approx 0,1...25 \text{ Н}$ .

Состав присадки  $(CF_x)_n$  для обкатки деталей турбостартёра: карбонофторид  $(CF_x)_n$  - 30...33% масс; поверхностно-активные вещества ПАВ – 6,0-6,3% масс; керосин – остальное.

Обкатку зубчатых колёс производили вне изделия на станках токарной группы по схемам, приведённым на рис.2 и 3.

При обкатке зубчатых колёс с наружным зацеплением (рис. 2) солнечная шестерня закрепляется в патроне токарного станка. Сателлит устанавливается на оправке, закреплённой в резцедержателе суппорта станка.

При обкатке зубчатых колёс с внутренним зацеплением (рис. 3) зубчатый венец кольцевой шестерни редуктора закрепляется в специальном приспособлении, установленном в патроне токарного станка. Сателлит устанавливается на оправке в резцедержателе станка.

Режимы обкатки: частота вращения шпинделя –  $n_{шп} \approx 100\div 1000 \text{ мин}^{-1}$ ; радиальная нагрузка –  $P \approx 0,1...250 \text{ Н}$ . Состав приработочной жидкости и время обработки те же, что и для подшипников.

Нагрузка в зубчатом соединении создаётся поперечным перемещением суппорта токарного станка. Контроль уровня нагрузки осуществляется по тарированному лимбу станка.

Прошедшие обкатку и контроль параметров подшипники и зубчатые колёса подлежали сборке и испытаниям в составе турбостартёра.

Таблица 1. Номенклатура обрабатываемых деталей

Наименование узла турбостартёра	Обозначение подшипника	Количество	Обозначение зубчатого колеса	Количество
Редуктор	85-276207P1	1	Шестерня солнечная (центральная)	1
	5-32206P8	1	Сателлит	3
	5-42204Б4	6	Шестерня кольцевая (зубчатый венец)	1
	26-42209J2T1	2		

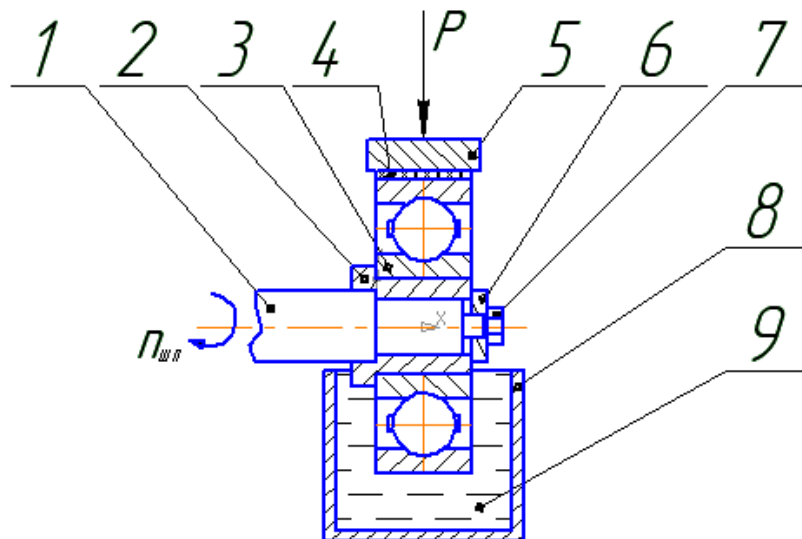


Рис.1. Схема обработки подшипников на машине трения МИ-1М:  
1 - шпиндель; 2 - втулка; 3 - подшипник; 4 - прокладка фрикционная; 5 - колодка тормоза;  
6 - шайба; 7- винт; 8 - ванна; 9 - приработочная жидкость

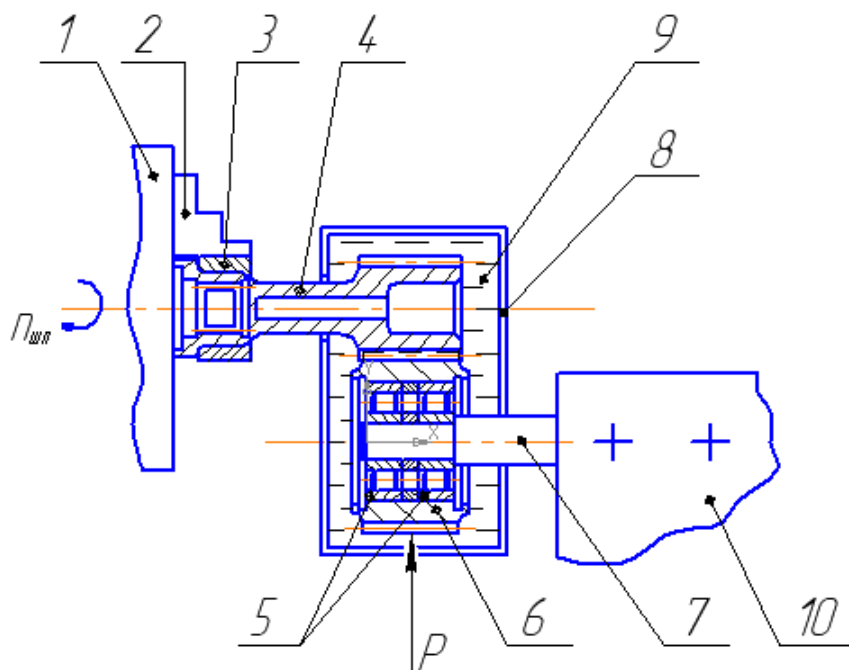


Рис. 2. Схема обработки зубчатых колёс. Наружное зацепление:  
1 - патрон; 2 - кулачок; 3 - полукольца; 4 - шестерня солнечная; 5- подшипники; 6 - сателлит; 7 - оправка;  
8 - суппорт; 9 - приработочная жидкость; 10 - суппорт

Обобщение результатов лабораторных и стендовых испытаний деталей турбостартера ТС-12М показало, что интенсивность износа при реализации технологии образования фторсодержащих защитных плёнок на поверхностях трения уменьшается не менее чем на 25÷30%; число циклов нагружения до наступления выкрашивания в подшипни-

ках возрастает в 1,2-1,5 раза; нагрузочная способность смазочного слоя повышается на 35÷40%; нагрузка заедания увеличивается до 2 раз; демпфирование вибрации усиливается в 1,5÷2 раза.

На международной выставке в Брюсселе разработка данной технологии была отмечена серебряной медалью.

Технологией, реализуемой на наноструктурном уровне для повышения износостойкости и других служебных свойств поверхностей трения, также является способ [4] диффузионного молекулярного армирования поверхностей (ДМА).

При реализации способа создаётся деформация длинных молекул, возбуждаемая путём вибрационного и термического воздействия на рабочую жидкость. Образующиеся

при этом радикалы органического типа представляют собой цепочки химически связанных атомов молекул, содержащие на конце незавершённую (оборванную) связь или так называемые активные центры с высоким уровнем свободной энергии, что обуславливает их высокую химическую активность.

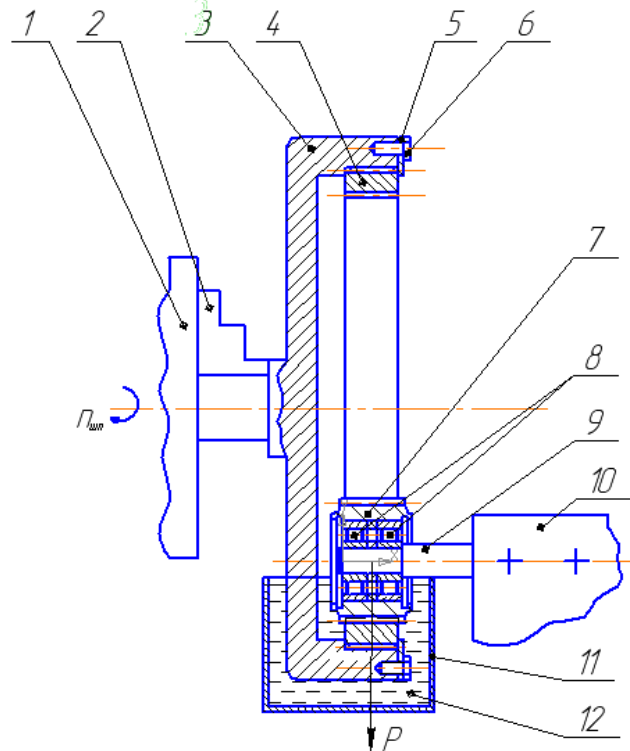


Рис. 3. Схема обработки зубчатых колёс.

Внутреннее зацепление: 1 - патрон; 2 - кулачок; 3 - приспособление; 4 - зубчатый венец кольцевой шестерни; 5 - планка; 6 - винт; 7 - сателлит; 8 - подшипники; 9 - оправка; 10 - суппорт; 11 - ванна; 12 - прирабочная жидкость

При взаимодействии радикалов с дефектами поверхности, также обладающих повышенным уровнем свободной энергии, происходит самопроизвольная миграция радикалов вглубь поверхностного слоя по дефектам структуры и его пассивация за счёт взаимной компенсации избыточной энергии дислокаций и радикалов.

Диффундировавшие в глубь поверхности наночастицы (радикалы) «армируют» материал поверхностного слоя, повышая его прочность и препятствуя скольжению дислокаций и образованию макродефектов.

Использование мультиполярного взаимодействия наноструктур - поверхност-

ного дефекта и свободного радикала - может быть отнесено к явлению самосборки, а упрочнённый слой можно рассматривать как большой наноструктурный массив (М. Ратнер), придающий поверхности особые эксплуатационные свойства.

Обработку подшипников и зубчатых колёс редуктора турбостартера ТС-12М по этой технологии производили вне изделия на стенде ВЭДС-10 (рис.4), содержащем электродинамический вибратор, ёмкость с рабочей жидкостью, блок возбуждения и измерения вибрации, термошкаф для нагрева рабочей жидкости и деталей.

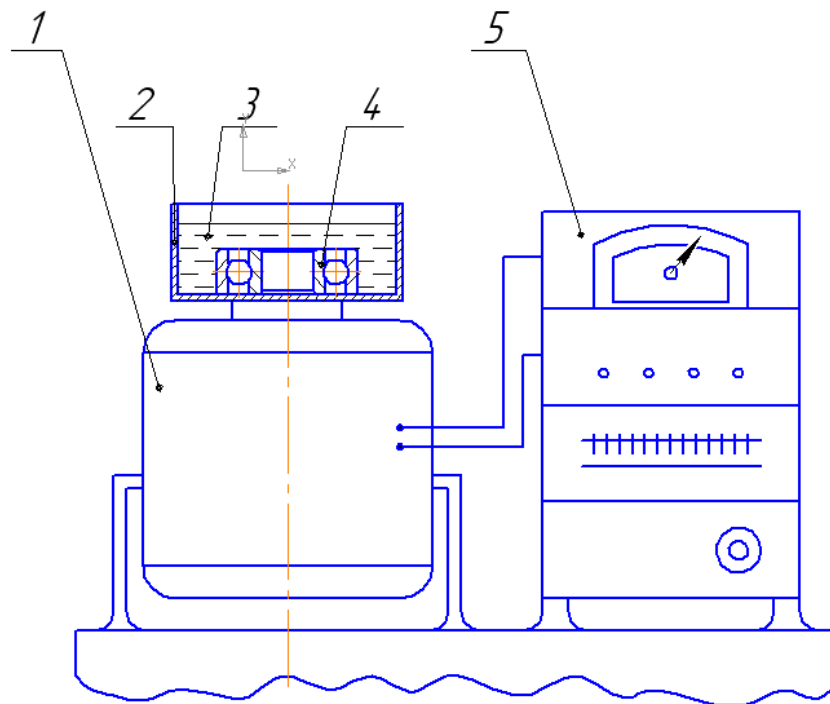


Рис.4. Схема обработки деталей методом ДМА:  
1 - вибратор электродинамический; 2 - ёмкость; 3 - рабочая жидкость;  
4 - обрабатываемая деталь; 5 - блок возбуждения и измерения вибраций

При реализации способа обрабатываемые детали погружают в рабочую жидкость, нагревают, выдерживают в условиях повышенной температуры при наложенной вибрации в течение 3-5 минут.

Режим обработки: частота вибрации 100-120Гц; амплитуда вибрации - до 0,5 мм; техническая ёмкость - до 3 л, обеспечивающая возможность полного погружения обрабатываемой детали в рабочую жидкость. Объём рабочей жидкости - 2÷3л. Температура нагрева рабочей жидкости и помещенной в неё детали – 80...90°C. Состав рабочей жидкости: керосин, присадка  $(CF_x)_n$  – (1...1,5)% масс. Время обработки – до 5 мин, время уточняется для каждой детали.

Прошедшие обработку и контроль детали направлялись на сборку и испытания турбостартёра.

Результаты оценки эффективности диффузионного молекулярного армирования при испытании подшипника на стенде ВНИИПП показали повышение износостойкости на разных деталях до 30 %, снижение и стабилизацию сил трения в пределах от 14 до 28 %.

Следующий апробированный способ является ответом на недостаточную адгезионную способность смазочных материалов. Известно, что при интенсивном нагружении и недостаточной адгезии происходит выдавливание смазки из контакта, разрушение смазочного слоя, взаимодействие металлических поверхностей, схватывание, контактная усталость и изнашивание.

В предложенном способе мультислойной смазки [5] повышение адгезии смазочного слоя и смазывающей способности достигали за счёт увеличения сил сцепления (липкости) твёрдых металлических поверхностей с материалом смазочного слоя путём введения промежуточного подслоя высоковязкой жидкости между металлической поверхностью и смазкой.

Эффективность технологии оценивали при испытаниях подшипников и зубчатых колес редуктора турбостартёра ТС-12М в специальных приспособлениях (рис.1 - 3), для чего на тщательно очищенные и просушенные поверхности трения наносили тонкий слой (3...5 мкм) кремнийорганической жидкости (полиметилсилоксана марки ПМС-60000).

После установки подшипники и зубчатые пары прокручивали вручную (для равномерно-

го распределения подслоя и присадки на поверхностях трения), затем вводили штатную смазку.

При испытаниях оценивали: температуру саморазогрева; момент трения, уровень шума, логарифмический декремент колебаний.

За время испытаний в течение 60 мин температура саморазогрева деталей оставалась постоянной, в пределах  $+25^{\circ}\text{C}$ ; момент трения снизился на 17,6%; уровень шума снизился на  $2,5\div 3$  дБ; поглощающая способность (логарифмический декремент колебаний) увеличилась в  $1,5\div 2$  раза.

Одна из разработок, проводимых совместно с ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», связана с необходимостью повышения динамической устойчивости клапанов, недопущения их вибрации (гудения) при перепуске газов.

Проработано нестандартное решение – замена твёрдых порошковых покрытий направляющей клапана на тканевую прокладку, наклеиваемую на её поверхность. Наилучшие показатели при лабораторных испытаниях получены на ткани – лён полотенечный по ГОСТ 10232-77.

Эскиз этого технического решения приведён на примере возможной компоновки дренажно-предохранительного клапана.

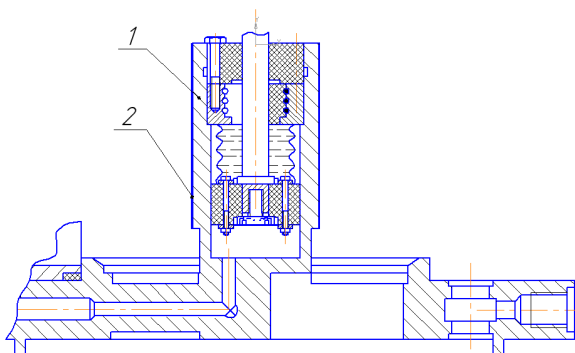


Рис. 5. Эскиз направляющей втулки дренажно-предохранительного клапана: 1 – направляющая втулка; 2 – наклеенная на направляющую клапана тканевая прокладка

При лабораторных виброиспытаниях клапана с тканевым покрытием резонансные колебания клапана в диапазоне частот  $1\dots 2500$  Гц практически не возникали.

Таким образом, показано, что возможна разработка эффективных технологий, реализуемых на микро- и наноструктурных уровнях, и технические мероприятия по их практическому применению в аэрокосмической технике обеспечивают существенное улучшение триботехнических и виброакустических характеристик узлов трения: снижение и стабилизацию сил трения, износа, температуры саморазогрева поверхностей трения, параметров вибрации и повышение рассеяния энергии колебаний.

Настоящая работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы по теме «Создание линейки газотурбинных двигателей на базе унифицированного газогенератора высокой энергетической эффективности» (шифр 2010-218-001, тема 001х-342-29г С4) приоритетного направления «Энергоэффективность и ресурсосбережение» по Постановлению Правительства РФ № 218 от 09 апреля 2010г.

### Библиографический список

1. Громаковский, Д.Г. Проблемы разработки термофлуктуационной модели изнашивания поверхности [Текст] / Д.Г. Громаковский, Б.М. Силаев, Л.М. Логвинов. // Трение и смазка в машинах и механизмах. -2009. -№6. – С. 45-48.
2. Современные технологии и долговечность поверхностей трения при усталостном механизме изнашивания [Текст] / Д.Г. Громаковский, В.А. Горохов, Г.А. Кулаков [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. - №3. – С.11-20.
3. А.с. 1309666. Способ получения антифрикционного покрытия на рабочих поверхностях деталей в узлах трения машин [Текст] / Д.Г. Громаковский, Н.Г. Макаров, Н.Д. Кузнецов [и др.]. - опубл. 08.01.87.
4. Пат. № 2198954. Способ упрочнения поверхности деталей [Текст] / Д.Г. Громаковский, А.Г. Ковшов, С.В. Шигин [и др.]. - опубл. 20.02.2003, Бюл. №5.
5. Пат. №2334909. Способ смазки узлов трения [Текст] / Д.Г. Громаковский, В.А. Николаев, В.И. Хаустов [и др.]. – опубл. 27.09.2008, Бюл. №27.

**METHODS OF INCREASE OF WEAR RESISTANCE  
AND VIBROAKUSTICHESKIKH OF PARAMETERS OF KNOTS OF THE  
FRICTION OF SPACE EQUIPMENT**

© 2012 D. G. Gromakovsky<sup>1</sup>, A. G. Kovshov<sup>1</sup>, E. P. Kotcherov<sup>2</sup>, M. V. Makaryants<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

<sup>2</sup>JSC "Kuznetsov", Samara

<sup>3</sup>"SSDB-Progress", Samara

The ways providing simultaneous increase of wear resistance, decrease in noise level and the vibration generated in knots of a friction are considered. The offered technologies are connected with formation containing fluorine the microdimensional films raising wear resistance, contact weariness and durability of connection of a lubricant layer with friction surfaces; the microreinforcing of superficial defects which is slowing down development of fatigue damages; the effect of multigreasing raising loading characteristics of a lubricant layer and its absorbing ability.

*The engine, gas generator, turbocompressor, a detail, a surface, a friction, deterioration, technology, vibration, greasing, multigreasing, fluorization, microreinforcing.*

**Информация об авторах**

**Громаковский Дмитрий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, директор НТЦ «Надёжность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [pnms3@mail.ru](mailto:pnms3@mail.ru). Область научных интересов: надёжность узлов трения технологических, энергетических и транспортных машин, исследование закономерностей изнашивания.

**Ковшов Анатолий Гаврилович**, кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологии в машиностроении, Самарский государственный технический университет. E-mail: [pnms3@mail.ru](mailto:pnms3@mail.ru). Область научных интересов: обеспечение износостойкости поверхностей при интенсивных режимах разрушения – фреттинг-коррозии, усталости и др.

**Кочеров Евгений Павлович**, кандидат технических наук, первый заместитель генерального конструктора, Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара. E-mail: [kotcherov\\_ep@motor-s.ru](mailto:kotcherov_ep@motor-s.ru). Область научных интересов: разработка основных технических решений по авиадвигателям.

**Макарьянц Михаил Викторович**, заместитель главного конструктора, начальник отделения, Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара. E-mail: [csdb@mail.samtel.ru](mailto:csdb@mail.samtel.ru). Область научных интересов: разработка основных решений по узлам трения клапанных систем ракет-носителей.

**Gromakovsky Dmitry Grigorevich**, doctor of technical sciences, the professor, the director of scientific and technological center "Reliability", Samara State Technical University. E-mail: [pnms3@mail.ru](mailto:pnms3@mail.ru). Area of research: reliability knots of a friction of technological, power and transport cars, research of wear process laws.

**Kovshov Anatoly Gavrilovich**, candidate of technical sciences, the associate professor of a nanotechnology in mechanical engineering Samara State Technical University. E-mail: [pnms3@mail.ru](mailto:pnms3@mail.ru). Area of research: area of scientific interests: ensuring wear resistance of surfaces at intensive modes of destruction – fretting-corrosion, fatigue, etc.

**Kocherov Evgeny Pavlovich**, candidate of technical sciences, first deputy general designer of «Kuznetsov», Samara. E-mail: [kotcherov\\_ep@motor-s.ru](mailto:kotcherov_ep@motor-s.ru). Area of research: area of scientific interests: development of the main technical solutions on aircraft engines.

**Makaryants Mikhail Viktorovich**, the deputy chief designer, the chief of office of SSDB-Progress", Samara. E-mail: [csdb@mail.samtel.ru](mailto:csdb@mail.samtel.ru). Area of research: development of the main decisions on knots of a friction systems of valves of rockets of carriers.