

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

© 2016

- Д. Г. Громаковский** доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», директор НТЦ «Надёжность», Самарский государственный технический университет, pnms3@mail.ru
- А. А. Коптев** главный инженер, АО «Авиаагрегат» холдинга «Технодинамика», г. Самара, aviaagregat@samtel.ru.
- Е. В. Крышень** начальник отдела новой техники, АО «Авиаагрегат» холдинга «Технодинамика», г. Самара, ev.kryshen@aviaagregat.net.
- В. И. Хаустов** директор по развитию, ОАО «Самарский подшипниковый завод», haustov@spzgroup.ru
- С. В. Шигин** ведущий инженер, НТЦ «Надёжность», Самарский государственный технический университет, pnms3@mail.ru

Рассмотрены результаты разработки технологий, обеспечивающих повышение износостойкости, снижение уровня шума и вибрации в узлах трения. Определены наиболее эффективные технологии образования на поверхностях трения фторсодержащих микроразмерных плёнок, повышающих износостойкость, контактную усталость и прочность соединения смазочного слоя с поверхностями трения; молекулярного армирования поверхностных дефектов, замедляющих развитие усталостных повреждений; эффекта мультисмазки, повышающего адгезию и нагрузочные характеристики смазочного слоя, его поглощающую способность и др. Технология образования фторсодержащих плёнок реализуется путём введения присадки фторированного графита в смазочное масло. При молекулярном армировании эффект повышения износостойкости и контактной выносливости связан с пассивацией поверхностных дефектов, образуемых при отделочной обработке. Пассивация дефектов реализуется армированием дефектов в резонансном режиме. При мультисмазке реализуется эффект от создания подслоя смазки из высокоадгезионного материала, например, полиметилсилоксанов. Важной сопутствующей разработкой является создание низкочастотного кавитационного способа и установок для мойки деталей узлов трения.

Узлы трения; смазочный слой; нагрев; износ.

Цитирование: Громаковский Д.Г., Коптев А.А., Крышень Е.В., Хаустов В.И., Шигин С.В. Повышение адгезионных свойств и нагрузочной способности смазочного слоя узлов трения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 53-59. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-53-59

Ресурс работоспособности узлов трения во многом обусловлен износостойкостью контактирующих поверхностей и эффективностью смазки, что широко отражается в современных трибологических исследованиях и разработках. В представленных материалах рассмотрен ряд новых способов, обеспечивших повышение износостойкости.

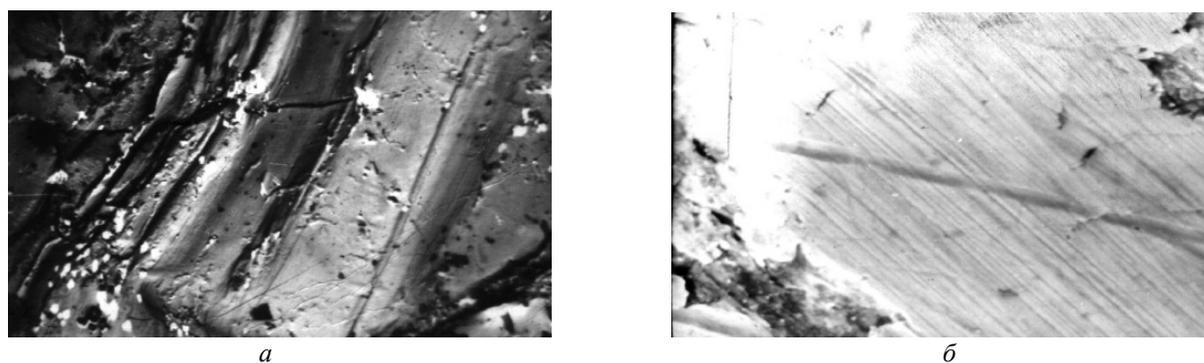
По авторским свидетельствам и патентам РФ № 830172, 1011676, 1030401, 1498052, 2017802, 2027745, полученным в Самарском государственном техническом университете (СамГТУ), разработана нанотехнология образования защитных плёнок фторидов железа.

Упрочнение здесь реализуется при обкатке механизмов в масле, содержащем частицы фторированного графита (CF_x)_n, имеющие нано- (микро) размерный уровень порядка 10^{-4} ... 10^{-6} мм, при самоорганизации и эволюции их структурного состояния (рис. 1).

Благодаря созданию фторсодержащих плёнок (рис. 1) интенсивность износа поверхностей уменьшается не менее чем на 25... 30%; число циклов нагружения до

наступления выкрашивания в подшипниках возрастает в 1,25...1,5 раза; нагрузочная способность смазочного слоя повышается на 35...40 %; демпфирование вибрации усиливается в 1,5...2 раза.

Механизм образования фторсодержащих плёнок реализуется в зоне трения за счёт частиц графита, образующего на поверхностях радикалы, несущие атомы фтора, формирующие эластичный износостойкий слой фторидов железа, отличающийся от обычной окисленной поверхности своей повышенной прочностью. Поверхности трения при этом (рис. 1) становятся более гладкими, выдерживают большее число циклов нагружения до наступления выкрашивания, хемосорбируют смазку и отталкивают воду – источник водорода, разъедающего поверхность.



*Рис. 1. Изменения состояния поверхности трения при введении в смазку присадки фторированного графита (x 10000):
а – поверхность после обработки шлифованием;
б – на поверхности трения образована плёнка фторидов железа FeF*

Разработанная в СамГТУ технология образования нано- (микро-) размерных фторсодержащих плёнок прошла испытания в лаборатории и при эксплуатации ряда изделий: авиационных газотурбинных двигателей; двигателей внутреннего сгорания автомобилей, тракторов и других машин; в газомоторных поршневых и роторных компрессорах, в приводах и шпинделях металлорежущих станков; в гидрожидкости АМГ-10 шасси самолётов; в масляных смазочно-охлаждающих жидкостях при нарезании зубчатых колёс, при протягивании.

Наибольший интерес имеют следующие результаты:

1. Газотурбинный двигатель НК-16 СТ наземного применения отработал шесть лет до капитального ремонта на газоперекачивающей станции «Карпинская» Тюмень-трансага на масле М8 вместо штатного масла МС-8П с добавлением фторсодержащей присадки СамГТУ. Ряд узлов трения этого двигателя (подшипники, уплотнения) износа практически не имели и были установлены на Казанском моторном заводе в ремонтируемых двигателях на следующий межремонтный срок. При использовании штатного масла МС-8П во время капитального ремонта замена подшипников производится в 90% случаев.

2. Трёхлетняя эксплуатация газомоторных компрессоров 10 ГКН на станции «Северная» Лентрансага показала, что введение фторсодержащей присадки в штатное масло МС-20 увеличивает износостойкость цилиндрических пар и других деталей компрессоров не менее чем на 30%.

3. При введении фторсодержащей присадки в пластичную смазку электрошпинделей получено двукратное увеличение их долговечности.

Эффективность разработанных в СамГТУ фторсодержащих присадок по сравнению с аналогами ряда ведущих международных фирм иллюстрируют результаты их испытаний на машине трения МАСТ-1 по ГОСТ 23.221-84 (рис. 2).

Технология образования фторсодержащих плёнок отработана на деталях пускового турбостартера ТС-12М, используемого для запуска газотурбинных авиадвигателей. В момент пуска ряд пар трения не имеет смазки. Для таких «тяжёлых» условий трения предложена технология обкатки в фторсодержащей среде с образованием защитных плёнок на поверхностях подшипников стартера и зубчатых колёс планетарной передачи.

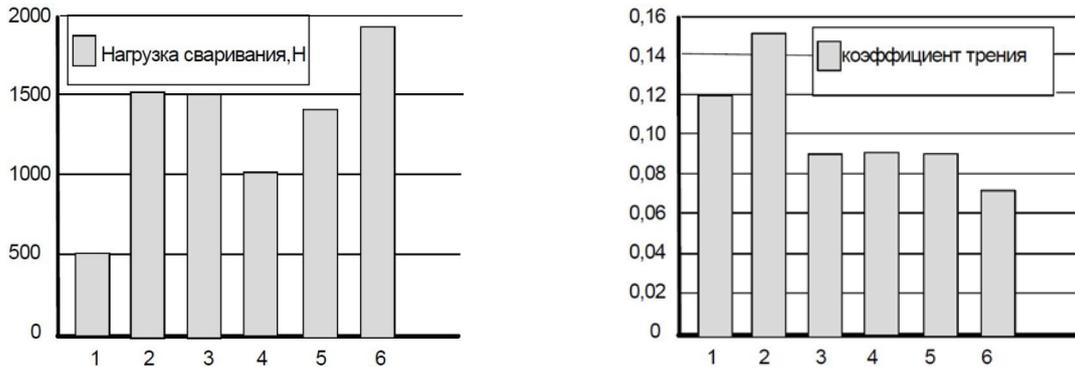


Рис. 2. Сравнение эффективности фторсодержащих присадок, введённых в масло М-5/10Г2: 1 – моторное масло без фторсодержащей присадки; 2 - присадка «LM» фирмы «Ликви Моли»; 3 – присадка «WM» фирмы «Вунс»; 4 – присадка «SLA-1» фирмы «Ачесон»; 5 – «SLA-3» фирмы «Ачесон»; 6 – присадка СамГТУ

Нано-(микро-) размерный уровень также имеет разработанный в Научно-техническом центре «Надёжность» СамГТУ способ мультисмазки [3]. Повышение нагрузочной способности смазочного слоя здесь получают путём введения промежуточного подслоя высоковязкой жидкости между металлической поверхностью и смазкой (рис. 3).

Способ эффективен в подшипниках качения, кулачковых, зубчатых и других парах и особенно при ударном и вибрационном характере нагрузки, когда контактные усилия кратковременно возрастают, смазочный слой частично или полностью разрушается и происходит взаимодействие металлических поверхностей, ведущее к изнашиванию и контактной усталости.

В качестве материала подслоя подобрана кремнийорганическая жидкость олигометилсилоксана с вариантами от ПМС-500 по ТУ6-02-737-78 до ПМС-60000.

Так, например, для повышения работоспособности роликовых подшипников автомобилей ВАЗ апробирована жидкость марки ПМС-60000, которую наносили на поверхности колец перед подачей штатной смазки (масло марки ТАД-17). Слой жидкости марки ПМС-60000 имеет толщину порядка 3 мкм. После нанесения подслоя смазки

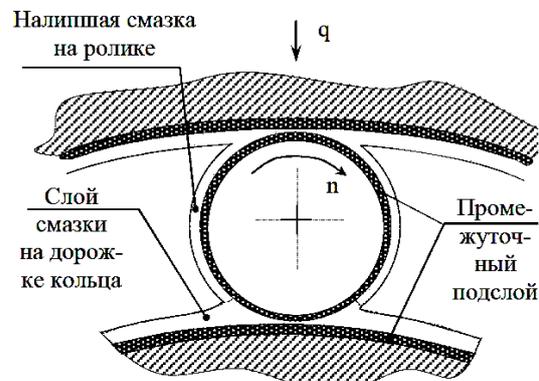


Рис. 3. Структура промежуточного подслоя в роликовом подшипнике качения

подшипник устанавливали на испытательный стенд, подавали смазку и проводили испытания.

Испытания подтвердили эффективность предложенного способа: за время испытания подшипник практически не нагревался, температура оставалась на уровне комнатной ($T \approx +25 \text{ }^\circ\text{C}$); момент трения снижался на 17,6%; уровень шума снижался на 2,5... 3,0 дБ; уровень вибрации снижался на 2...3 дБ; пятно износа при испытаниях на 4-шариковой машине трения уменьшилось на 30 и более процентов.

В ОАО «СПЗ» были проведены испытания метода мультисмазки на подшипниковых узлах ряда металлорежущих станков (табл. 1). Все перечисленные подшипниковые узлы при введении мультисмазки отработали не менее 1,5...2,0 ресурсов.

При испытаниях технологии мультисмазки (ПМС-60000, смазка Томфлон СК-250) в опорах скольжения шарошек буровых долот были превышены показатели наиболее эффективных антифрикционных смазок США, выпускаемых фирмой «Hughes Christensen, Smith и Varel» (табл. 2).

Таблица 1. Объекты испытания способа мультисмазки в шпиндельных подшипниках

Описание оборудования (наименование, модель)	Узел	Тип подшипника	Кремнийорганическая жидкость
Внутришлифовальный автомат 3485	Шпиндель	Радиально-упорный 436210	ПМС-60000
Торцешлифовальный станок 4340	Бабка изделия	Радиально-упорный 36205E	ПМС-60000
Бесцентровосферошлифовальный станок БСШ-300	Шпиндель 7311A480	Радиально-упорный 4-46220Л	ПМС-60000
Бесцентровошлифовальный станок САСЛ-200х500	Шпиндель	Радиально-упорный 4162920	ПМС-60000

Таблица 2. Результаты стендовых испытаний в опорах буксовых долот

№ п/п	Характеристики испытаний	Медьсодержащая смазка для долот фирмы «Hughes Christensen, Smith и Varel» (США)	Томфлон СК-250
1.	Скорость износа, мкм/ч	0,5	0,37
2.	Максимальная контактная нагрузка (при серебряном покрытии), кгс/см ²	40 - 45	65...67
3.	Температура саморазогрева (при максимальной нагрузке), °С	160	97 - 115
4.	Демпфирующая способность, δ	0,4	0,8

Идентичным вышеприведённой разработке является способ диффузионного молекулярного армирования поверхностей деталей машин по патенту РФ № 2198954, который реализуется путём диффузионного внедрения наночастиц или активных органических молекул вглубь материала по выходам на поверхность дефектов кристаллической решётки металлов.

В результате на поверхности образуется модифицированный слой, «прошитый» прочными цепочками химически связанных атомов (рис. 4).

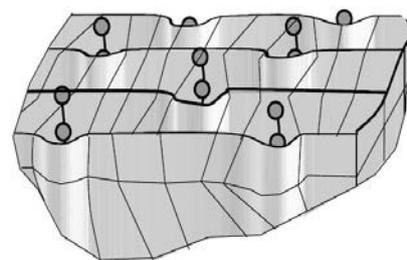


Рис. 4. Схема пассивации поверхностных дефектов

Диффундировавшие наночастицы или органические молекулы одновременно производят два действия: во-первых, закрепляют дефекты, что затрудняет их смещение относительно друг друга под действием внешней нагрузки и возможность генерировать новые дефекты, и, во-вторых, препятствуют взаимодействию выходящих на поверхность дислокаций с активными частицами окружающей среды, что во многом обуславливает ресурсоповышающий эффект и коррозионную стойкость.

При молекулярном армировании вначале производят подготовку поверхностей – их мойку и слабое травление. На втором этапе производят операцию молекулярного армирования. Детали погружают в технологическую термоактивированную (порядка 80-90_°C) органическую жидкость, например масло индустриальное, с внесёнными твёрдыми частицами и подвергают жидкость вибрации в резонансном режиме. Нагрев и вибрация вызывают разрушение органических молекул масла. В местах их разрыва образуются активные реакционные окончания, которые вместе с твёрдыми частицами взаимодействуют с активными центрами на поверхностях, проникают вглубь металла по линейным дефектам кристаллической решётки и армируют их поверхности. Об эффективности нового способа свидетельствуют результаты склерометрических испытаний, приведённые в табл._3.

Таблица 3. Результат склерометрических испытаний образцов из стали 40X

№	Виды обработки	Микротвёрдость, Н _ц , кг/мм ²	Удельная энергия активации пластической деформации, Дж/мм ³
1.	Обработка притиркой на чугунной плите	250	20,8
2.	Поверхностно-пластическое деформирование (накатка)	430	21,2
3.	Упрочнение по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза	825	21,5
4.	Упрочнение взрывом	465	21,7
5.	Новый способ	795	22,2

Наблюдаемое на поверхностях деталей повышение износостойкости достигает 25%, снижение и стабилизация силы трения имеют тот же порядок [1].

Важными сопутствующими разработками по применению изложенных выше технологий явилось создание кавитационного способа и установок для мойки поверхностей деталей (Патенты РФ № 1734886, 2024336, 2287739) и установки для переработки нефтяных шламов, которая успешно прошла испытания в цехе № 2 НГДУ «Сергиевск-нефть».

По Патенту РФ № 60160 разработаны пластинчато-эластомерные амортизаторы, демпфирующие динамическую нагрузку в узлах трения. Частотный диапазон эффективной работы амортизаторов составляет 10...1500 Гц. Вертикальная нагрузка на один комплект до 30 кН. Демпфирующий эффект пластинчатого вкладыша (равного размера с резиновым) повышает этот показатель в 2...3 раза.

Область применения данных разработок – аэрокосмическая техника, энергетика, транспорт, добывающие отрасли, нефтеперерабатывающая промышленность и машиностроение.

Библиографический список

1. Ибатуллин И.Д., Горохов В.А., Кулаков Г.А. Современные технологии и долговечность поверхностей трения при усталостном механизме изнашивания // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 3. С. 11-20.
2. Громаковский Д.Г., Кочеров Е.П. Нанотехнологии при производстве узлов трения газотурбинных авиадвигателей. <http://mirprom.ru/public/nanotehnologii-pri-proizvodstve-uzlov-treniya-gazoturbinnih-aviadvigateley>
3. Громаковский Д.Г., Макарьянц М.В., Ткаченко С.И. Разработка склерометрического способа исследования активационных параметров повреждаемости и разрушения поверхностей, деформируемых трением // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 1. С. 35-42.

IMPROVEMENT OF ADHESIVE PROPERTIES AND LOAD CAPACITY OF THE LUBRICANT LAYER OF FRICTION UNITS

© 2016

- D. G. Gromakovsky** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, director of the «Nadezhnost» Research and Development Center, Samara State Technical University, Samara, Russian Federation, pnms3@mail.ru
- A. A. Koptev** Chief Engineer, JSC «Aviaagregat», «Tekhnodinamika» Holding, Samara, Russian Federation, aviaagregat@samtel.ru
- E. B. Kryshen** Head of Technology Utilization Office, «Aviaagregat», «Tekhnodinamika» Holding, Head of the Section «Organization of Research», Ministry of Industry and Technologies of Samara Region, Samara, Russian Federation, ev.kryshen@aviaagregat.net
- V. I. Haustov** Development Director, JSC «Samara Bearing Plant», Samara, Russian Federation, haustov@spzgroup.ru
- S. B. Shigin** leading engineer, «Nadezhnost» Research and Development Center, Samara State Technical University, Samara, Russian Federation, pnms3@mail.ru

The results of development of the technologies ensuring an increase of wear resistance, lowering of noise and vibration level in frictional units are discussed in the paper. The most efficient technologies of formation of fluorinated microsized films on the friction surface improving the wear resistance, contact fatigue and durability of connection of the lubricant layer with friction surfaces; molecular reinforcement of surface defects decelerating the development of fatigue damages; the effect of multilubrication improving adhesion and load characteristics of the lubricant layer, its absorbing capacity, etc. are determined. The technology of formation of fluorinated films is implemented by the introduction of graphite fluoride additive to lubricant oil. In the case of molecular reinforcement the effect of increasing wear resistance and contact endurance is connected with the passivation of surface defects formed in final treatment. Defect passivation is realized by dipping of the processed details in the oil containing solid particles in the resonant mode. In the case of multilubrication the effect of creating an underlayer of lubricant on the basis of a highly adhesive material, for example, of polimetilsiloksan produced by the JSC «TogliattiAzot» is realized. The creation of a low frequency cavitation method and installations for washing parts of friction units at the «Nadezhnost» Research and Development Center of SSTU is an important collateral development. The first installations are implemented at the JSC «Progress» Space–Rocket Center and the JSC «Aviaagregat» of the «Tekhnodinamika» Holding.

Friction units; lubricant layer; heating; wear.

Citation: Gromakovsky D.G., Koptev A.A., Kryshen E.B., Haustov V.I., Shigin S.B. Improvement of adhesive properties and load capacity of the lubricant layer of friction units. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 53-59. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-53-59

References

1. Ibatullin I.D., Gorokhov V.A., Kulakov A.G. Modern technology and the durability of the friction surfaces with a fatigue mechanism of wear. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*. 2006. No. 3. P. 11-20. (In Russ.)
2. Gromakovsky D.G., Kocherov E.P. *Nanotekhnologii pri proizvodstve uzlov treniya gazoturbinnnykh aviadvigatelay* [Nanotechnologies in the manufacture of friction units of gas-turbine engines]. Available at: <http://mirprom.ru/public/nanotekhnologii-pri-proizvodstve-uzlov-treniya-gazoturbinnnyh-aviadvigatelay>
3. Gromakovsky D.G. Makaryants M.V., Tkachenko S.I. Development of sclerometric method of studying activation of parameters of damage and fracture of friction deformable surfaces. *Journal of Friction and Wear*. 2014. V. 35, Iss. 1. P. 25-31.
DOI: 10.3103/s1068366614010048