

УДК 621.891.2

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН; А.А. ГУЩА  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматриваются методы и средства повышения надёжности и срока службы механизмов и машин, дана их характеристика. Отмечены основные факторы повышения надёжности и долговечности машин, такие как обеспечение высоких технико-эксплуатационных показателей сопряженных поверхностей деталей на стадии приработки и в период их эксплуатации. Для улучшения этих процессов применяют прирабочные и ремонтно-восстановительные составы, модифицирование наноразмерными алмазосодержащими добавками. Представлены основные исследования ведущих научных центров и специалистов по данной тематике. Выявлены их достоинства и недостатки. Исходя из анализа доказано, что представленные методы позволяют значительно повысить износостойкость механизмов и машин и их технико-эксплуатационные показатели.*

Потери средств от трения и износа достигают 4...5 % национального дохода, а на преодоление сопротивления трения затрачивается во всем мире 20...25 % энергии, вырабатываемой за год [1]. Непрерывное повышение нагрузочно-скоростных режимов работы машин и механизмов требует постоянного совершенствования их конструкции, методов технического обслуживания и ремонта. Большое значение в деле повышения износостойкости имеет использование новых триботехнологий, современных смазочных материалов, разработанных на основе достижения триботехники.

**Характеристика методов трибомодифицирования.** Одним из факторов, влияющих на надёжность и долговечность машин, выступает приработка сопряженных поверхностей деталей. Применение прирабочных препаратов при изготовлении и ремонте машин и механизмов позволяет интенсифицировать приработку, тем самым сократить продолжительность этапа приработки и продлить зону установившегося режима изнашивания. За счёт этого уменьшается число отказов машин и механизмов в период эксплуатации и повышается их срок службы. В качестве прирабочных составов используют смазочные составы, содержащие твердые компоненты (карбиды, окиси кремния и др.), полимеры. Отрицательные эффекты, имеющие место при использовании абразивных составов, – это возможность внедрения частиц абразива в мягкие поверхности обрабатываемых пар трения и износ сопряженных твердых поверхностей.

При исчерпании доремонтного и межремонтного ресурса пар трения машин и механизмов применяют ремонтно-восстановительные составы (РВС), которые при эксплуатации образуют на поверхностях трения антифрикционные противозносные покрытия длительного действия. Их применение позволяет восстановить изношенные поверхности трибосопряжений до первоначальных параметров. Стоимость ремонта по РВС-технологии в 2...3 раза ниже, чем при использовании обычных технологий, что позволяет заменить плановые ремонты планово-предупредительной обработкой с увеличением межремонтного срока в 1,52 раза [2]. Известные в настоящее время РВС по компонентному составу, физико-химическим процессам их взаимодействия с трущимися поверхностями можно разделить на три группы: реметаллизанты (металлоплакирующие составы), полимерсодержащие препараты и геомодификаторы.

*Металлоплакирующие смазки* могут быть использованы для всех типов узлов трения: крестовин, наконечников рулевых тяг, подшипников, шестерен и др. В состав таких смазок входят порошки металлов, их оксиды, сплавы, соли, комплексные и другие соединения. Механизм их действия заключается в металлоплакировании трущихся поверхностей вследствие осаждения металлических компонентов, входящих в их состав во взвешенном или ионном виде. При этом частично устраняются микродефекты, снижается коэффициент трения, значительно повышается износостойкость плакированных поверхностей, увеличивается интервал между заменами смазки, а также они успешно работают в тяжело нагруженных узлах трения. Однако для существования металлоплакирующего слоя необходимо постоянное присутствие реметаллизанта в масле.

Известно более 20 отечественных и несколько зарубежных препаратов металлоплакирующего действия. Наиболее распространены из них составы типа: РиМет, МКФ, МС, Lubrifilm metal (Швейцария); Remetallisant Moteur (Великобритания) и др.

В настоящее время для улучшения технико-эксплуатационных показателей трибосопряжений спектр материалов, вводимых в используемые смазочные композиции, расширяется, а также разрабатываются новые методы получения уже известных материалов. Например, предложена металлоплакирующая смазочная композиция, содержащая ультрадисперсный порошок меди, полученный с помощью электрического взрыва проводников [3]. Такой порошок имеет ряд специфических свойств: сферическая форма частиц ( $d_{cp} = 0,15$  мкм), избыточная запасённая энергия, склонность к самоспеканию. За счёт этого достигается быстрая притирка поверхностей трения и образуется достаточно толстая сервовитная плёнка, в

результате чего происходит восстановление изношенных пар трения. На основе литола с применением высокодисперсного порошка-наполнителя (цинка, бронзы или свинца), полученного методом испарения и конденсации в атмосфере нейтрального газа на вакуумной установке, разработан состав, обеспечивающий безыносную работу пар трения в процессе их эксплуатации и позволяющий восстановить уже изношенную поверхность трения при одновременном сохранении основных технологических показателей смазки [4]. В патенте [5] авторы предлагают металлоплакирующую присадку, содержащую ультрадисперсные порошки (УДП) железа и алмаза. При совместном использовании УДП железа и УДП алмаза на поверхности трения образуется алмазометаллический композит, сочетающий высокую твердость (устойчивость к изнашиванию) и плакирующие свойства (толщина слоя до 4 мкм), чего не наблюдается при их раздельном использовании.

Ещё одним методом повышения долговечности трибосопряжений за счёт модифицирования поверхностей трения является применение металлоплакирующих смазок, в состав которых введены дисперсные ферромагнетики. Практическое значение имеют переходные металлы, а также некоторые их интерметаллические соединения, например железо-никель, железо-кобальт. Наиболее широко применяют магнетит. Он имеет хорошую адсорбционную способность по отношению к ПАВ, а также способен образовывать коллоидные дисперсии с высокой намагниченностью. Разделительный слой, образующийся в зоне контакта и препятствующий взаимодействию деталей узла трения в таких смазках, формируют частицы металлов или металлосодержащие соединения, заполняя микронеровности поверхностей трения и уменьшая тем самым величину контактного давления. В качестве таких добавок используют высокодисперсные порошки цинка, бронзы, меди, свинца и некоторые другие с размером частиц 10...100 мкм, соли монокарбоновых кислот с металлами или металлический порошок – промышленный отход электрохимического процесса гальваники (содержащий медь), смешанный с олеиновой кислотой. При формировании металлоплакирующей плёнки в зоне контакта происходит ускорение переноса магнитоактивных частиц из объёма смазки, что обеспечивает снижение износа, момента трения и повышения противозадирной стойкости узлов трения.

Для повышения надежности и экономичности двигателей применяют полимерсодержащие препараты, включающие в своем составе политетрафторэтилен (тефлон), поверхностноактивированный фторопласт-4, перфторпропиленоксид, перфторполиэфир карбоновой кислоты (эпилам), силикон и некоторые другие полимерные вещества. Эти препараты появились раньше остальных и изначально использовались для обеспечения кратковременного сохранения подвижности боевой техники в случае серьёзного повреждения масляной системы.

Наибольшее применение в качестве полимеробразующей композиции в смазочных материалах нашёл политетрафторэтилен, благодаря чему на поверхностях трения формируется тонкое (около 1 мкм) структурированное покрытие, обеспечивающее повышенную адгезию, противоизносный и антифрикционные эффекты. Эффективность препаратов определяется уровнем ультрадисперсности ПТФЭ, диспергированием частиц в растворителе, наличием ПАВ, усиливающих механическое взаимодействие. Недостаток выражается в необходимости их постоянного присутствия в масле и ядовитости некоторых продуктов их горения.

Зарубежными и отечественными учёными разработано множество различных композиций на основе минералов естественного и искусственного происхождения, получивших наименование «геомодификаторы». Попадая на поверхности трения вместе с маслом или в составе пластичной смазки, они инициируют процесс формирования на трущихся поверхностях наноразмерной структуры с высокой износостойкостью и малым коэффициентом трения. В результате применения концентрированной взвеси геомодификатора трения (ГМТ) на основе серпентина с дисперсностью природного минерала 0,01...5 мкм в двигателях, механизмах и устройствах на 50...70 % снижается износ узлов трения, в 1,5...2 раза потери на трение и на 50...100 % виброактивность [6]. Это обусловлено увеличением фактической площади контакта и формированием на исходной структуре динамического ультратонкого слоя углеводородных цепочек, частиц ГМТ и продуктов износа менее микрометра (квасисжиженный слой).

На основе серпентина и сопутствующих ему примесей разработан состав [7] для обработки пар трения, который включает мелкодисперсный порошок алмаза или шунгита, а также металлосодержащую добавку – смесь мелкодисперсных порошков металлов, выбранных из металла основы и металлов, образующих устойчивые системы с материалом основы, взятых из ряда Cr, Ni, Mo, Nb, Ti, и их сплавы. Такое сочетание компонентов обеспечивает формирование прочносвязанного с поверхностью трения модифицированного упрочненного поверхностного слоя заданного состава, за счет чего достигается стабильное уменьшение износа и коэффициента трения, улучшение технических показателей механизмов и машин. Например, для пары трения сталь 45 – сталь 45, поверхности которой обработаны таким составом, характерны следующие технико-эксплуатационные показатели: твердость 390...410 HRC, коэффициент трения 0,006...0,008 компенсация износа 1...3 мм [7]. Однако при применении геомодификаторов в узлах и механизмах нередко наблюдается потеря температурной стабильности и, как следствие, многочисленные случаи их выхода из строя по причине перегрева пар трения, а также значительное увеличение расхода масла.

Один из путей повышения качества и износостойкости рабочих поверхностей деталей на стадии изготовления (восстановления) и в период их эксплуатации – применение финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Сущность ФАБО состоит в том, что поверхности стальных или чугунных деталей после их традиционной окончательной обработки резанием покрывают тонким слоем (1...3 мкм) антифрикционного медьсодержащего покрытия путём трения. При этом используют явление избирательного переноса металла при трении.

К достоинствам использования процесса ФАБО относятся: низкий расход материала и механической энергии; безвредность для окружающей среды; короткая продолжительность нанесения покрытия (несколько секунд и минут); стабильное и хорошее качество покрытия; экономическая целесообразность при большом и небольшом числе изделий.

Применение ФАБО совместно с металлоплакирующими составами позволяет увеличить срок службы трибосоприкосов в 2...2,5 раза. Однако это возможно только при постоянном наличии металлоплакирующих составов в зоне контакта поверхностей трения.

Метод плакирования гибким инструментом, основанный на использовании в стандартных технологиях шлифования в качестве инструмента вместо абразивных кругов дисковых проволочных щеток, изготовленных из металлов и сплавов, формирующих металлоплакирующий слой на рабочей поверхности обрабатываемой детали, позволяет интенсифицировать ФАБО, повысить производительность и улучшить экономические показатели металлоплакирования узлов трения. Повысить качество и производительность процесса ФАБО возможно и за счёт применения вибрации (осцилляции) инструмента – способ ФАБВО (финишная антифрикционная безабразивная вибрационная обработка)

Автором [8] предложен новый способ повышения послеремонтного ресурса деталей автомобильного двигателя: сочетание ФАБО и эпиламинирования трущихся поверхностей деталей, который назван ФАБО-эпиламинированием. Сущность способа заключается в нанесении поверхностно-активного вещества (эпилама) на поверхности пар трения после применения ФАБО. При этом на поверхности детали образуется тонкая пленка перфторполиэфира карбоновой кислоты, обеспечивающая низкий коэффициент трения соединения, а также предохраняющая детали от коррозии и водородного износа. Применение ФАБО-эпиламинирования позволяет: снизить износ соединений в 5...5,7 раза; повысить эффективную мощность двигателя ЗМЗ-5Э на 7,5 %; повысить давление масла в главной магистрали двигателя ЗМЗ-5Э на 9 %; снизить расход топлива двигателя ЭМЗ-53 на 3 %.

В настоящее время учеными всего мира большое внимание уделяется нанотехнологиям. С целью повышения противозносных и антифрикционных свойств смазочных материалов применяют их модифицирование наноразмерными алмазосодержащими добавками. Используют как синтетический, так и природный технический алмазный порошок. Это позволяет расширить диапазон их рабочих температур и нагрузок. Однако следует отметить, что использование в качестве добавки природного технического алмазного порошка приводит к необходимости тщательного отбора и контроля однородности применяемого природного материала как по размерам частиц, так и по их составу.

Представленные в работе [9] результаты исследований показывают, что введение ультрадисперсного порошка алмазографита (УДП-АГ) в пластичную смазку ЦИАТИМ-201 повышает её антифрикционные свойства, позволяет снизить рабочую температуру узла трения на 13...15 %, коэффициент трения скольжения на 25...32 % и уменьшить шероховатость трущихся поверхностей в 1,5...2 раза. В составе смазочных материалов УДП-АГ часто применяют в сочетании с другими ультрадисперсными добавками и присадками. В этом случае характер их взаимодействия и концентрация определяют свойства смазочных материалов, а также технико-эксплуатационные показатели обработанных таким составом поверхностей трения. При совместном использовании УДП железа и УДП-АГ на поверхности трения образуется алмазо-металлический композит, сочетающий высокую твёрдость (устойчивость к изнашиванию), плакирующие свойства (толщина слоя до 4 мкм), а также обеспечивающий синергетический эффект (коэффициент трения на стадии приработки не превышает 0,23 для пары «сталь 3 – сталь 3») [10]. Исследования смазочного материала, содержащего УДП-АГ (0,2...5 %) в сочетании с высокодисперсной солью сульфата олова, показывают уменьшение интенсивности изнашивания в 2 раза и коэффициента трения на 12...15 %. В то же время нагрузочная способность возрастает на 25 %. В случае уменьшения концентрации УДП-АГ происходит режим трения обычный для смазки без присадок. Если концентрация будет больше 5 %, то трение переходит в режим неустойчивого граничного трения, сопровождающегося ростом коэффициента трения и износа [11].

Сотрудниками научно-производственного объединения «Алтай» разработана и проведена серия промышленных испытаний антифрикционной смазки для абразивной обработки материалов, в состав которой включены ультрадисперсный алмаз и дисульфид молибдена. В результате, применение смазки с кластерными алмазами позволяет повысить эффективность операции шлифования и заточки на 10...25 %, чистоту обрабатываемой поверхности в 1,5...2 раза с одновременным улучшением экологических условий ведения работ [12].

**Заключение.** Рассмотренные в статье методы и средства трибомодифицирования поверхностей трения позволяют значительно повысить их износостойкость (до 70 %), технико-эксплуатационные пока-

затели в 1,5...2 раза, сократить продолжительность и улучшить качество их приработки, понизить температуру работающих узлов (до 15 %), уровень шума и вибрации, что существенно влияет на повышение надёжности и срока службы механизмов и машин.

Модифицирование пластичных смазочных материалов наноразмерными алмазосодержащими добавками обеспечивает повышение противозадирных свойств, оказывает приработочный эффект за счет повышения твердости контактирующих поверхностей при измельчении структуры поверхности трения в процессе интенсивной пластической деформации микронеровностей под воздействием твердых частиц алмаза и в результате дисперсного упрочнения при внедрении частиц алмаза в поверхность трения. Также способствует снижению коэффициента трения в результате уменьшения шероховатости поверхности трения и частичной замене трения скольжения на трение качения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаруков, Д.И. Триботехника, конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д.И. Гаруков. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 629 с.
2. Кочанов, Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения / Д.И. Кочанов // РИТМ. – М.: МИПК МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – № 8(56). – С. 16–21.
3. Состав для обработки пар трения и способ его изготовления: пат. 2168662 РФ, МПК С10М 125/04. / А.П. Ильин [и др.]; заявитель Республ. науч.-техн. центр по восстановлению и упрочнению деталей машин и механизмов СО РАН. – № 4827712/04; заявл. 22.05.1990; опубл. 10.02.1996 // Бюл. № 16.
4. Пластичный металлоплакирующий состав: пат. 2139920 РФ, МПК С10М 125/04. / И.В. Фришберг [и др.]; заявитель И.В. Фришберг. – № 98103404/04; заявл. 24.02.1988; опубл. 20.10.1999 // Бюл. № 11.
5. Металлоплакирующая присадка: пат. 2178803 РФ МПК С 10М 125/02. / Е.В. Никитин [и др.]; заявитель Гос. предприятие «Комбинат “Электрохимприбор”». – № 99126880/04; заявл. 16.12.1999; опубл. 27.01.2002 // Бюл. № 3.
6. Состав смазочных материалов: пат: 2176267 РФ МПК С 10М 125/26. / Ю.Г. Лавров, В.Н. Половинкин; заявитель Военно-морская акад. им. Адмирала Флота Сов. Союза Н.Г. Кузнецова. – № 2000104440/04; заявл. 22.02.2000; опубл. 27.11.2001 // Бюл. № 2.
7. Состав для обработки пар трения: пат. 2168662 РФ МПК С 10М 125/02. / С.Н. Александров [и др.]; заявитель С.Н. Александров. – № 2000115545/04; заявл. 15.06.2000; опубл. 10.06.2001 // Бюл. № 4.
8. Харченко, М.М. Повышение послеремонтного ресурса деталей автомобильных двигателей (на примере ЗМЗ-53) эпиламиранием и ФАБО-эпиламиранием: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.20.03 / М.М. Харченко; Моск. гос. агроинж. ун-т им. В.П. Горячкина. – М.: 2002. – 17 с.
9. Докшанин, С.Г. Повышение свойств пластичных смазочных материалов применением ультродисперсного наполнителя / С.Г. Докшанин; ФГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск. – 2010. – С. 341–345.
10. Антифрикционная присадка: пат. 2225879 РФ МПК С 10М 125/00. / Л.А. Поляков [и др.]; заявитель Федеральное гос. унитарное предприятие «Комбинат “Электрохимприбор”». – № 042002121965/04; заявл. 12.08.2002; опубл. 20.03.2004 // Бюл. № 3.
11. Пластичная смазка: пат. 2163921 РФ МПК С 10М 125/00 / С.И. Щелканов [и др.]; заявитель Красноярский гос. техн. ун-т. – № 99110709/04; заявл. 12.05.1999; опубл. 10.03.2001 // Бюл. № 6.
12. Антифрикционная смазка для абразивной обработки материалов: пат. 2030449 РФ МПК С 10М 125/02 / А.И. Баранов [и др.]; заявитель Науч.-производств. объединение «Алтай». – № 4931340/04; заявл. 26.04.1991; опубл. 10.03.1995 // Бюл. № 5.

Поступила 06.07.2015

#### METHODS AND MEANS TRIBOMODIFITSIROVANIYA FRICTION

A. DUDAN, A. HUSHCHA

*The characteristic of methods and means of improving the reliability and service life of machines and mechanisms. It noted the main factors increasing the reliability and durability of machines, such as providing high technical and operational parameters of the mating surfaces of parts on the stage of running and during their operation. To improve these processes and apply Break-damage control compositions, modification of diamond nano-sized additives. The main study of leading research centers and experts on the subject. Identified the advantages and disadvantages of these methods. Based on the analysis proved that the presented methods can significantly improve the wear resistance, technical and operational performance.*