

ИСПЫТАНИЯ ДОБАВОК К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

*А.В. Дунаев, канд. техн. наук, зав лабораторией № 5,
В.А. Александров, канд. техн. наук, зав лабораторией № 4
(ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, 499-174-81-71, dunaev135@mail.ru),
О.Г. Павлов, канд. мед. наук, канд. биол. наук, ген. директор ТК
«НЕОСФЕРА» (г. С.-Петербург, opavlov2002@mail.ru),
И.Ф. Пустовой, ген. директор ООО «РеалИнПроект»,
(г. С.-Петербург, pustovoi@yandex.ru),
С.А. Сокол, ген. директор ООО НВФ «Триботехнология»
(г. Пятигорск, tribo18@inbox.ru),
Г.Е. Селютин, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Ин-та химии и
химической технологии СО РАН (г. Красноярск, sgend@icct.ru)*

Аннотация. Рассмотрены условия испытаний смазочных композиций на машинах трения и на трибометре TRB-S-DE.

Ключевые слова: нагрузка, скорость скольжения, динамика, пересопряжение.

В связи с развитием применения добавок к смазочным материалам для повышения работоспособности сопряжений трения [1, 2] необходим контроль их триботехнической эффективности на машинах трения, на стендах с полно-размерными агрегатами и в эксплуатации.

Испытания смазочных композиций проводятся на разнообразных машинах трения. Отечественными из них являются СМТ-1, СМЦ-2, ИИ5018 по схемам ролик-колодочка, ролик-ролик, палец-диск, а также четырехшариковая машина трения. Используется швейцарский лабораторный прибор – трибометр TRB-S-DE – по схеме палец-диск, палец-возвратнопоступательно перемещаемая пластина. Отечественные машины позволяют создавать предельные режимы испытаний, чем не обладает трибометр TRB-S-DE, предел силы трения которого 5 N·m.

Однако все машины и приборы имеют принципиальный недостаток, т.к. не позволяют реализовать реальные условия работы узлов и агрегатов машин. Средства испытаний работают, как правило, при постоянной скорости и неизменном направлении скольжения, постоянной на отдельных этапах испытаний нагрузке, медленно меняющейся температуре смазки, постоянном, т.е. беззазорном контакте пары, как правило, с обилием смазки, а реальные сопряжения работают при:

- переменных нагрузочно-скоростных и температурных режимах,
- переменном зазоре в сопряжении,
- ударных пересопряжениях,
- смене направления скольжения, например, в сопряжении поршень-кольца в момент перекаладки поршня в ВМТ,
- смене режимов трения от граничного, через смешанное, к гидродинамическому и обратно, где решающими для процессов трения являются отсутствие или недостаточность смазывания,
- разнообразных в эксплуатации длительностях работы и остановок, что обуславливает переменность состава смазки при неустановившемся трении и постепенное его изменение в длительной эксплуатации.

Трение при гидродинамической смазке наиболее благоприятно, здесь изнашивание в смазке без абразива и без агрессивных жидкостей происходит только из-за динамического воздействия смазки на поверхности деталей и высокая в таких условиях их износостойкость не лимитирует долговечность сопряжений. Лимитирующими ресурс является трение при граничной и смешанной смазке, что должно быть объектом исследований и обязательно иметь место в машинах трения.

Молекулярно-механическая природа трения в условиях граничной и полужидкостной смазки является совокупностью сложного комплекса процессов взаимодействия поверхностей и смазочного материала, изменения физико-химических свойств поверхностей, разрушения ослабленных приповерхностных слоев, восстановления первичных свойств и аналогичного повторения этих процессов. При этом, когда нагрузки и характеристики поверхностей не обуславливают интенсивных упругих и пластических деформаций, в смазке нет абразивных и агрессивных примесей и смазочная пленка все же разделяет поверхности, решающими факторами трения являются адсорбция при низких температурах (до 120-150°C) и хемосорбция при 150-300°C на поверхностях трения компонентов присадок из масел.

Если же в смазку вводят добавки (порошковые минеральные твердые и мягкие, металлические мягкие, полимерные; соли мягких металлов жирных кислот; трибополимеробразующую ЭФ-357; образующие галогениды металлов; эпиламы и эпиламоподобные, фторкарбоную кислоту; соли мягких металлов и серпентин; серпентин и трибополимеробразующую ЭФ-357; комплекс разнообразных искусственных и естественных минералов), то механизм процессов трения из классического упрощенного становится испытателю неизвестным.

Если добавки к маслам работают по механизму низкотемпературной адгезии (Аспект-Модификатор, Универсальный Модификатор, Форум, Микро ХЗ, Энергия 3000 и их аналоги), образуя органический молекулярный «ворс» или трибополимерное покрытие (присадка ЭФ-357, составы на основе PTFE и их аналоги), то стационарные режимы работ машин трения допустимы.

Для эпиламов, эпиламоподобных, как и других добавок, химически модифицирующих поверхности трения с образованием галогенидов металлов и мономолекулярного органического «ворса» (КАМП, ER, SMT, SMT-2, Fenom и их аналоги), по-видимому, требуется подогрев смазочного материала до 100 °С.

Для солей жирных кислот мягких металлов, обуславливающих ионообмен с металлами деталей, в смазочном материале требуются условия, соответствующие условиям электролиза. По-видимому, сюда можно отнести и требования к условиям работы высокодисперсных порошков мягких металлов (составы РИМЕТ, Кластер и их аналоги). Для них, обеспечивающих металлоплакирование, по-видимому, более благоприятна кислая реакция трибосреды ($pH < 5$, КЧ = 3,5-5), а моторные масла имеют щелочную реакцию ($pH > 8$, КЧ = 0,5-3,0). К тому же перспективность металлоплакирования сомнительна из-за случавшегося в эксплуатации отслаивания медной пленки.

Сложный режим испытаний требуют порошки естественных и искусственных минералов: наноалмазных КАРАТ-5, КАРАТ-М и их аналогов; геомодификаторов (ГМТ) из группы серпентина (НИОД, РВС, АРТ, СУПРОТЕК, ТСК-М, ХАДО, МЕГАФОРС, РВД, Rutec-Reanimator, ЭДИАЛ и их аналоги); комплексных составов с такими минералами (АРВК и Стрибойл).

Рассмотрим версию механизма работы минеральных добавок, предложенную одним из авторов статьи - Г.Е. Селютиным. Естественно, что смазки и добавки должны создавать на поверхностях трения, или, например, хотя бы на одной из них, мягкий пластичный слой, что соответствует важному положению трибологии: положительный градиент механических свойств от поверхности вглубь детали, а иначе - твердая и прочная подложка, средний мягкий слой, а

наверху – пластичный* (по О.Г. Павлову напоминаем, что оптимальными могут быть и трибопары, когда одна поверхность твердая, а другая мягкая с большой разностью их твердостей). Образование пластичной поверхности возможно, например, при образовании добавками слоя, удерживающего масло, не создающего гальванопару с электрохимической коррозией, путем адсорбции или хемосорбции на поверхностях трения фрагментов масла или аналогичных по трибосвойствам ассоциатов.

Для этого можно ввести в смазку порошок таких дисперсных активных частиц, которые под ударом поверхностей трения разрушаются с выделением энергии излучений (по данным некоторых зарубежных исследований - образуется трибоплазма, которая и обуславливает физико-химические преобразования серпентина и поверхностей сопряжений [3]). Так, например, пьезокристаллические частицы при разрушении искрят и часть выделяемой ими энергии идет на образование связей поверхностей трения с компонентами смазки и продуктами изнашивания.

По Г.Е. Селютину, в условиях трения при граничной или смешанной (полужидкостной или полусухой) смазке пьезочастицы, в т.ч. наноалмазы, «разваливаясь» по радикальному механизму, могут «пришиваться к поверхности» трения вместе с маслом, которое в этот момент окислилось и образовало смолистые фрагменты. Поэтому наноалмазные трибопрепараты, например КАРАТ-5, образуют черные, грязноватые, но гладкие и твердые покрытия. Частицы серпентина, механически разрушаясь, под действием трибоплазмы, работая больше по физхимии, образуют прозрачные, оранжево-золотистые, а позже - светло-коричневые покрытия также с преобладающим содержанием на самой поверхности углерода, которые многими зарубежными исследователями характеризуются как алмазоподобные углеродные пленки (DLC-films). Однако следует учитывать, что большое поверхностное содержание углерода обнаружено д.т.н. В.Ф. Пичугиным в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина на трибопленках, образованных медь- и алюминийсодержащими трибопрепаратами.

Все же разрушение частиц гидросиликатов магния по В.В. Зуеву необходимо и для того, чтобы в них происходил разрыв силоксановых связей Si-O-Si, образования нескомпенсированных связей Si-O⁻, а после поглощения водорода, то и образования силанольных групп Si-OH, предотвращающих известное в некоторых случаях водородное изнашивание металлов.

Версии, необходимого по большинству версий начального этапа работ минеральных трибопрепаратов, могут реализовываться лишь при некоторых вариантах поведения частиц в сопряжениях трения, обусловленных величинами зазоров, толщиной смазочной пленки, соотношениями твердостей частиц и поверхностей сопряжений, что рассмотрено д.т.н. М.А. Григорьевым в НАМИ [4]. Им предложены четыре версии поведения высокотвердых частиц в подвижных сопряжениях (рис.1):

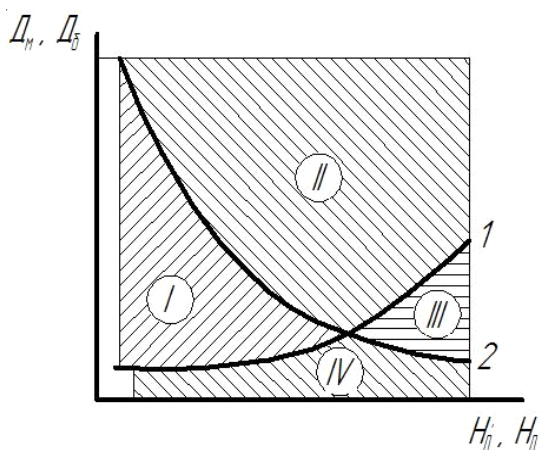


Рис. 1. Зоны (I, II, III и IV) поведения частиц минералов в сопряжениях в зависимости от их размера, величины зазора между деталями и соотношения твердостей их поверхностей H_1/d , H_2/d :

D_m - размер частицы, более которого она может быть подвергнута дроблению;
 D_b - критический размер, менее которого частица не может быть раздроблена;
 H_1 - твердость наименее твердой детали

I-я версия – частицы шаржируют деталь с наименьшей твердостью, если наименьший диаметр частиц больше зазора в сопряжении (λ), но меньше критического размера, при котором частицы еще могут дробиться: $\lambda < D_m \leq D_b$;

II-я – частицы дробятся парой трения, если их наименьший диаметр больше зазора λ и больше размера измельчения D_d : $\lambda < D_m > D_b$;

III-я – частицы не шаржируют поверхности деталей, но могут дробиться, если они меньше зазора (λ), но больше размера измельчения D_b : $\lambda > D_m > D_b$;

IV-я – частицы балластно, как «третье тело», мигрируют в смазке, если они меньше зазора в паре (λ) и меньше размера измельчения: $\lambda > D_m < D_b$.

Из рассмотренных версий можно предположить, что для механического воздействия на частицы наноалмазов, серпентина и других активных, должны обеспечиваться версии II-я и III-я, а I-я сомнительна. В реальных сопряжениях при переменных зазорах, различной твердости поверхностей могут быть все версии поведения частиц, а если их поступление извне прекращается, то инертные, например, бемит, постепенно подшлифовывая поверхности и измельчаясь до балласта, временно выполняют полезную роль «третьего тела».

Для активных частиц минералов, что следует из вышеизложенного, обязательным является дробление, а их размер должен быть больше минимальной толщины пленки граничной, а лучше гидродинамической смазки, т.е. 0,1-5,0 мкм, не 10-100 нм (по С.А. Соколу, наиболее эффективно работают наноразмерные частицы, которые легче поддаются воздействию трибоплазмы и образуют трибопокрытие уже через 5 мин). В любом случае, из рис. 1, подкрепляя общие положения, также следует, что для различных трибосопряжений нужно подбирать минералы различной дисперсности.

Как бы то ни было, главный вывод из рассмотренного – машина трения должна обеспечивать пересопряжение пары трения для ударного действия на активные частицы и разделения поверхностей пары, чтобы пассивные частицы смогли проникать в пространство между плоскостями сопряжения и быть в роли их «третьего тела». Для этого в некоторых испытаниях использовали наложение на трибопару вибраций перпендикулярно плоскости разъема пары или в ее плоскости.

Пересопряжение нужно и потому, что первым этапом работы серпентинов считается «мягкое абразивное воздействие» ими поверхностей трения, по-видимому, для сошлифовки органической и окисной пленок, удаления ослабленных или разрушенных структур и открытия ювенильной, каталитически активной поверхности металлов. Важность ударного пересопряжения подтверждается тем, что по данным, например, В.И. Тишакова и других [5, 6], оно позволяет наращивать до 0,5 мм РВС-слои виброударными головками, работающими от ВЧ-генераторов, а естественным образом – при работе зубчатых колес и подшипников качения.

Другое требование некоторых разработчиков ГМТ – перерыв в испытаниях. Так, С.Н. Подчуфаров [7] считает, что после часа-полтора РВС-обработки агрегата и образования первичного ГМТ-слоя следует остановить агрегат на сутки зимой и на двое - летом, чтобы этот непрочный, вначале желто-золотистый, а позднее светло-оранжевый, легко снимаемый пальцем слой окреп благодаря абсорбции атомарного водорода разорванными силоксановыми связями в гидросиликатах [8] и не был изношен продолжительной обработкой. Различие в длительности остановок летом и зимой С.Н. Подчуфаров объясняет разными скоростями диффузии водорода в РВС-слой на поверхностях деталей при различном соотношении остывания деталей и картерного масла в разных климатических условиях.

Таким образом, трибопрепараты требуют своих методов испытаний, которые полностью реализовать на традиционных средствах, по-видимому, невозможно. Частично они реализуются на вибротрибометрах д.т.н., проф. М.С. Ос-

тровского (МГГУ) и на некоторых машинах, где на пару трения воздействуют вибрацией.

Достоинство трибометра TRB-S-DE – программное управление режимами, наглядность изменения силы и коэффициента трения, возможность выявлять их вариацию, свидетельствующую о циклической смене особенностей трения. Характерны на нем звуки и вибрации работы трибопары. Поэтому обеспечение в трибометре непрерывной подачи частиц минералов в зазор трибопары позволило бы сделать этот прибор универсальным.

Тем не менее трибометр в сопряжении шар-диск или острие пальца-диск позволяет создавать давление до 300 МПа и при скорости скольжения 100 см/с за 1000 – 1500 м пути трения дает возможность сравнивать триботехнические характеристики смазочных композиций.

Все лабораторные испытания должны обеспечивать идентичность получаемых трибохарактеристик эксплуатационным (вида и интенсивности изнашивания, величины коэффициента трения). А так как трение является комплексом физико-химических явлений, подверженных существенному влиянию динамики механических и тепловых воздействий, то для идентичности трибохарактеристик испытываемой пары трения натурным необходимы:

- идентичность физико-механических и геометрических характеристик пары трения, в т.ч по применяемым материалам, шероховатости поверхностей,
- идентичность характеристик «третьего тела» (смазочного материала и всех добавок в нем),

- соответствие или корректное моделирование условий испытаний (по динамике нагрузок, скоростей скольжения и температуры в контакте, длительности остановок и перепаду температур) в реальных сопряжениях и модели, несоблюдение чего может различить их триботехнические характеристики на порядок,
- и как интеграл – идентичность процессов трения и изнашивания.

Необходимыми триботехническими показателями испытаний являются:

- установившиеся интенсивность изнашивания и коэффициент трения при корректно выбранных нагрузке, скорости скольжения, температуре в контакте, соответствующих реальным в агрегатах и ТУ на смазочный материал, а также при обеспечении нормальных и тангенциальных воздействий по частоте и форме на испытываемое сопряжение, близких к эксплуатационным для исследуемых узлов и агрегатов,

- величины уменьшения интенсивности изнашивания и коэффициента трения в тех же условиях после введения испытываемых трибопрепаратов в смазку,

- ресурс смазки и смазочного слоя от введения трибопрепарата до повышения коэффициента трения на 25 % от минимального уровня,

- несущая способность трибосопряжения – удельная нагрузка, при которой деформация менее прочного элемента достигает допустимого значения,

- текущая температура в контакте трибопары или масла на ее выходе.

Желательно контролировать ток или разность потенциалов между элементами трибопары, что исследовалось, например, в дипломном проекте студента ГОУ ВПО «Военмех» (С.-Петербург) Н.И. Пустового с помощью Череповецкого ИВК «Кронверк».

В Наноцентре ГОСНИТИ в 1300 испытаниях 53 препаратов выявлены высочайшие нагрузочные и антифрикционные свойства масла Mobil SJ/SL 0W-40 (при нагрузке 200 МПа коэффициент трения 0,025), что при испытаниях масла М-10Г_{2К} достигнуто лишь с трибопрепаратом Evo[®]lution С.А. Сокола. Несколько большие (0,035-0,045) коэффициенты трения имеют наноалмазные препараты КАРАТ-5, серпентиновые препараты ООО «РИП» и ГНУ ВИЭСХ, в то время как базовое масло обеспечивало в тех же режимах коэффициент трения 0,06-0,08.

На основании проведенных испытаний и анализа литературы временными условиями сравнительных испытаний на трибометре TRB-S-DE нами приняты:

- постоянная скорость скольжения 100 см/с,
- постоянные стальной палец и полированный диск с твердостью 170-180 НВ, на котором можно провести 4-5 испытаний (при радиусах установки пальца 29,13-26,15 мм),
- 15-18 г масла М-10Г_{2к} в чаше трибометра, основного в МТП АПК,
- диаметр пятна контакта на острие пальца 0,5-0,6 мм,
- короткая (500 м) приработка трибопары при нагрузке 2-5 N,
- путь трения в испытаниях 1000 – 1500 м до стабилизации коэффициента трения или же до установления его значительного неуклонного роста,
- максимальная (конструктивная) нагрузка на палец – 60 N, что при высоких триботехнических свойствах смазок не позволяло полностью их выявлять,
- ступенчато повышаемая от этапа к этапу испытаний нагрузка от 5 до 60 N, а также ступенчато снижаемая нагрузка,
- частота регистрации силы трения 0,1-0,5 Гц (из-за высокой чувствительности трибометра высокочастотная регистрация импульсов силы трения приводила к остановке прибора, даже когда среднее значение силы трения не превышало 4 N·m при предельном значении 5 N·m).

Результатами испытаний нами приняты: начальное (в установившемся процессе) и конечное значения коэффициента трения; максимальная нагрузка на палец без остановки трибометра на заданном пути трения; начальное и конечное значения высоты держателя пальца над диском; при этом учитывалось, что цепочка деталей трибометра от опоры вращаемой чаши до крепления пальца (125 мм стальной и 20 мм алюминиевой) из-за прогрева в испытаниях удлиняется на 2 мкм/°С (125 мм × 12·10⁻⁶ + 20 мм × 25,4·10⁻⁶). Из-за этого кривая регистрации высоты держателя в испытаниях опускается на 10-15 мкм, а жарким летом 2010 г. опускалась на 20-25 мкм. Это затрудняет или делает невозможным оценку изнашивания пальца трибометром.

В отдельных испытаниях с минеральными трибоэрепаратами замечены нехарактерные звуки (скрипы), стуки и вибрации узла трения трибометра и такие равномерно повторяющиеся явления: при постоянном среднем значении в течение 3-5 с идут плавные нарастающие и 3-5 с плавно уменьшающиеся вариации силы трения, что может быть весь период испытаний. Такие характерные явления, как на трибометре TRB-S-DE, так и на машине СМТ-1, свидетельствуют о циклически повторяющихся сменах неустановившегося и установившегося процессов (рис. 2).

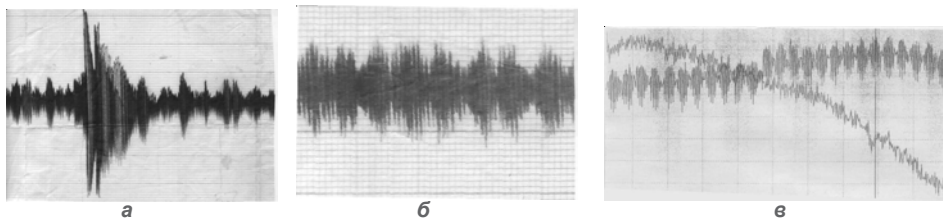


Рис. 2. Циклические изменения силы трения на машине трения СМТ-1 (а, б, данные В.А. Александрова) и коэффициента трения на трибометре TRB-S-DE (в)

Выявлено также, что если после максимальной нагрузки в режиме ступенчатого нагружения ввести режим ступенчатой разгрузки, то устанавливаются заметно меньшие силы трения, но при минимальной нагрузке они выравниваются.

Заключение: режимы испытаний минеральных трибопрепаратов особенно требуют их максимального приближения к условиям работы трибосопряжений машин, что в стандартных машинах трения пока недостижимо. Это обстоятельство требует обязательной оценки наиболее эффективных по лабораторным испытаниям трибопрепаратов в условиях эксплуатации, а в дальнейшем – разработки новых машин трения.

Литература

1. Дунаев А.В. Состояние применения нетрадиционной триботехники для без-ремонтного восстановления сопряжений трения узлов и агрегатов машин и оборудова-ния. Сборник научных трудов. Семинар «Современные технологии в горном машиностроении». // - Москва. МГГУ.- Москва, 2012.- С. 154-163.
2. Дунаев А.В., Остриков В.В., Пустовой И.Ф. Исследования ГОСНИТИ, ВНИИТиН и ООО «РИП» в области нетрадиционной триботехники Материалы III-й Всероссийской научно-практической конференции «Ремонт. Восстановление. Реновация». Уфа, 28.02-02.03.2012 С. 55-57.
3. Сокол С.А., Дунаев А.В. Формирование катализатором «Evo®lution» в зонах трения алмазоподобных углеродных пленок Материалы международной конференции «Проблемы синергетики в трибологии, трибохимии, материаловедении и мехатронике». // Новочеркасск. НПИ. Новочеркасск, 2012, С.141-145.
4. Григорьев М.А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания. М. Машиностроение, 1983, 148 с ил.
5. Пустовой И.Ф., Червоненко Ю.А., Маринич Т.Л., Головлев Г.А. Патент РФ № 2209851. Способ ультразвуковой обработки металлических поверхностей.
6. Лазарев С.Ю. Патент РФ № 2303650. Способ формирования минеральных по-крытий поверхностей деталей из металлов и сплавов.
7. Подчуфаров С.Н. Патент РФ № 2345176. Способ формирования восстанавливающего антифрикционного и износостойкого покрытия для деталей и узлов меха-низмов и машин.
8. Зувев В.В. Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты). С.-Пб, Наука, 2005, с. 400.

TESTS OF ADDITIVES TO LUBRICANTS

*A.V. Dunaev, c.t.s., manager laboratory No. 5 of Public Scientific Institution GOSNITI of the Rosselkhozakademiya's (499-174-81-71), dunaev135@mail.ru,
V.A. Aleksandrov, c.t.s., manager. laboratory No. 4 of Public Scientific Institution GOSNITI of the Rosselkhozakademiya's (499-174-81-71), dunaev135@mail.ru,
O. G. Pavlov, к.м.н, к.б.н., gen. director of TC «NEOSFERA», of St.-Petersburg,*

*opavlov2002@mail.ru,
I.F. Pustovoy, general director of open company «Realinproyekt, of St.-Petersburg,
pustovoi@yandex.ru,*

*S.A. Sokol, director general of JSC NVF «Tribotekhnologiya», Pyatigorsk),
tribo18@inbox.ru,*

*G. E. Selyutin, c.t.s., leading research associate in-that Chemistry and chemical technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Krasnoyarsk, sgend@icct.ru*

Annotation. Ttest conditions of lubricant compositions by machines of a friction and on tribometre are considered by TRB-S-DE.

Keywords: loading, speed of sliding, loudspeaker, reinterface.