

А. П. Перекрестов, В. А. Непомнящий

МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОИЗНОСНОЙ ПРИСАДКИ НА МАГНИТНОЙ ОСНОВЕ

Введение

Как известно, уже со второй половины XX в. надежность, экологичность машин, аппаратов, транспортных средств и технологического оборудования начали определяться в основном не показателями прочности, а трибологическими показателями узлов и деталей, работающих с трением. В XXI в., безусловно, роль трибологических показателей возрастет еще больше.

В связи с этим трибологические явления должны учитываться при проектировании и эксплуатации машин и механизмов. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4–5 % национального дохода, а преодоление сопротивления трения поглощает во всем мире 20–25 % энергии, вырабатываемой за год [1].

Влияние масел на долговечность и надежность деталей машин определяется их способностью защищать трущиеся поверхности от износа, обеспечивать необходимые характеристики их трения, снижать потери на трение. Разработка новых эффективных смазочных материалов (СМ) является одним из путей повышения долговечности узлов трения и снижения энергоемкости современной техники [1]. Принципиально новые конструктивные и смазочные материалы создаются один раз в 10–15 лет, а то и реже [2]. Задача повышения экологически и экономически целесообразной долговечности узлов трения крайне усложняется каждый год, т. к. развитие науки, техники и технологии неумолимо ведет к ужесточению и усложнению режимов работы машин, а значит, узлов трения и деталей по нагрузкам, скоростям, температурам, диссипируемым энергиям вибрации, условиям воздействия различных газовых и жидких сред, воздействию радиоактивных излучений и т. д. [1].

Улучшение триботехнических показателей уже имеющихся СМ путем введения в них присадок представляет собой наиболее оптимальный и экономически целесообразный способ решения данной проблемы [2]. В настоящее время разработано большое количество присадок к маслам, оказывающих на свойства последних многообразное влияние, большинство присадок многофункциональны. Масштабы применения присадок растут и, по прогнозам, ожидается их дальнейший рост.

Все это требует новых подходов, новых разработок с использованием современных научных достижений.

Классификация и характер действия противоизносных присадок в маслах

Композиции присадок, добавляемых к моторным маслам, различаются в зависимости от назначения и условий применения масел. Количество присадок, добавляемых к маслам, может составлять от нескольких до 25–30 % готового масла. Обычно композиция присадок к современному моторному маслу содержит следующие функциональные присадки: беззольные диспергирующие (дисперсанты), детергенты (моющие присадки), антиокислительные, противоизносную, антикоррозионную, противопенную, депрессорную. Кроме того, всесезонные масла почти всегда содержат вязкостные (загущающие) присадки, в энергосберегающих маслах обычно содержится антифрикционная присадка – модификатор трения.

Создано несколько десятков присадок в масляную систему, призванных обеспечить снижение потерь на трение и скорость износа деталей двигателя. Однако классификация подобных препаратов достаточно условна.

По структуре и свойствам основных активных компонентов, воздействующих на узлы трения машин, присадки можно классифицировать следующим образом.

1. Реметаллизаторы поверхностей трения

Это составы, в которых в нейтральном носителе, полностью растворимом в масле, содержатся соединения или ионы мягких металлов. Эти соединения, попадая в зону трения, заполняют микронеровности и создают плакирующий слой, восстанавливающий поверхность. Его соединение с основным металлом происходит на механическом уровне. Поверхностная твердость и износостойкость слоя существенно ниже соответствующих параметров стали или чугуна, из которых изготовлены основные детали двигателя, поэтому для существования слоя необходимо постоянное присутствие реметаллизатора в масле.

Замена масла в данном случае быстро сводит к нулю эффект от начальной обработки. Более того, даже кратковременное отсутствие препарата в масляной системе приводит к «состругиванию» защитного слоя с поверхности цилиндров поршневыми кольцами, особенно в пусковых режимах. Поэтому нередко наблюдаются случаи заклинивания двигателя после обработки такими препаратами.

2. Тефлонсодержащие антифрикционные препараты

Тефлон – хороший антифрикционный и антипригарный материал, эффективно действующий практически сразу после попадания в зону трения. Однако хорошо известна и нестойкость тефлоновых покрытий. Как и в предыдущем случае, для эффективной работы присадки необходимо ее постоянное присутствие в масле. Кроме того, тефлон – теплоизолятор, вследствие чего наличие тефлонового слоя на стенках камеры сгорания ведет к существенному росту температуры газа в цилиндре. С одной стороны, это хорошо, поскольку увеличивается эффективность работы двигателя и снижается выброс CO и CH, с другой – наблюдается практически двукратный рост выхода окислов азота в отработавших газах. Вдобавок наличие фторсодержащих частиц тефлона в зоне горения приводит к образованию в отработавших газах следов ядовитого фосгена. Именно поэтому применение таких препаратов резко ограничено в США и Западной Европе.

3. Полимерные антифрикционные препараты

Эти препараты появились раньше остальных, создавались специалистами оборонной промышленности и изначально имели узкое назначение – обеспечить кратковременное сохранение подвижности боевой техники в случае серьезного повреждения масляной системы.

Долгая работа препарата в масляной системе двигателя обычного автомобиля была исследована слабо. Видимый эффект от использования полимерных антифрикционных препаратов сводился к росту мощности мотора и снижению расхода топлива. Однако эффект снижения расхода топлива быстро пропадал, а причина увеличения давления масла со всей очевидностью вскрывалась при разборке двигателя: приемный грибок масляного насоса и масляные каналы «зарастали» полимером, сечения каналов уменьшались, что и приводило к росту давления.

Уменьшение расхода масла, естественно, отрицательно сказывалось на работе подшипников двигателя. Пока действовала полимерная защита поверхностей трения, это было не очень заметно, но как только она пропадала, износ двигателя и расход топлива резко возрастали, а мощность падала. Следует отметить, что современные полимерные препараты недалеко ушли от антифрикционных препаратов первого поколения.

4. Ремонтно-восстановительные составы на базе минеральных порошков

Эффект действия базируется на уникальных свойствах минерала серпантивита (змеевика), обнаруженных при бурении сверхглубоких скважин на Кольском полуострове. Тогда неожиданно обнаружилось, что при прохождении слоев горных пород, насыщенных минералом серпантивитом, ресурс режущих кромок бурового инструмента резко увеличивается. Дальнейшие исследования показали, что серпантивит в зоне контакта бура с горной породой разлагается с выделением большого количества тепловой энергии, под воздействием которой происходит разогрев металла, внедрение в его структуру микрочастиц минерала и образование композитной металлокерамической структуры (металл-минерал), обладающей очень высокой твердостью и износостойкостью. Позже предпринимались многочисленные попытки использовать порошки серпантивита для обработки двигателя. Обработка поверхностей трения в моторе действительно наблюдается – происходит микрошлифовка поверхностей цилиндров, растет компрессия, уменьшается скорость износа. Однако при применении ремонтно-восстановительных составов (РВС) в двигателях неожиданно возникла серьезная проблема: агрегат, обработанный минералами, теряет температурную стабильность, в результате чего стали наблюдаться многочисленные случаи выхода двигателей из строя по причине перегрева деталей цилиндропоршневой группы. Помимо прочего выявилось, что в процессе приработки двигателя с РВС из-за резкого увеличения температур цилиндра значительно увеличивается расход масла и достаточно часто отпускаются термофиксированные поршневые кольца.

5. Эпиламные (эпиламоподобные) и металлоорганические антифрикционные восстанавливающие составы

Действие эпиламных (эпиламоподобных) антифрикционных препаратов основано на формировании так называемых эпиламных слоев на всех поверхностях трения двигателя. В зоне трения под воздействием высоких контактных давлений и температур реализуется механизм

локальных поверхностных реакций, при котором «съедаются» выступы шероховатостей. Продуктами реакции – соединениями металлов – заполняются впадины шероховатостей и дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе эксплуатации силового агрегата.

Эпиламный износостойкий антифрикционный слой формируется на атомарном уровне и является, по сути, структурой кристаллической решетки металла, что определяет высокую прочность слоя. Он формируется один раз, при начальной обработке, и в дальнейшем не требует присутствия препарата в масле. Аналогичный эффект может быть достигнут за счет ввода в состав присадок поверхностно-активных веществ (ПАВ) различной природы – галогенов (классическое эпиламообразующее вещество – фтор) или органических соединений. В последнем случае защитный слой образуется металлоорганическими соединениями, близкими по свойствам к классическим эпиламам. Они существенно дороже материалов других групп, однако, как показали исследования, никаких отрицательных последствий для двигателя, за исключением некоторой нестабильности результатов обработки, применение этих препаратов за собой не влечет.

Магнитные противозносные присадки

В настоящее время известно большое число смазочных сред, в состав которых введены порошки, в том числе нанодисперсные частицы металлов, оксидов, полимеров, углерода [3]. Большой интерес вызывает дисперсный ферри- или ферромагнетик. Типичными ферримагнетиками являются ферриты – химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами металлов, имеющие общую формулу MFe_2O_4 (ферриты-шпинели) или MFe_5O_{12} (ферриты-гранаты), а также гексаферриты, двойные фториды и другие соединения металлов группы железа и редкоземельных элементов [4]. Из ферримагнетиков наиболее широко применяют магнетит. Это соединение оксидов железа FeO и Fe_2O_3 , содержащих ионы двух- и трехвалентного железа. Магнетит является ферримагнетиком со структурой шпинели и по электрическим свойствам может быть отнесен к полупроводникам *n*-типа. Преимущества магнетита – хорошая адсорбционная способность по отношению к ПАВ, а также способность образовывать коллоидные дисперсии с высокой намагниченностью. Наиболее важные физические свойства магнетита при температуре 293 К: плотность – $5,24 \cdot 10^3$ кг/м³; точка Кюри – 858 К; намагниченность насыщения – 477,7 кА/м; начальная относительная магнитная проницаемость – 70; удельное электрическое сопротивление – $5 \cdot 10^{-5}$ Ом.

К ферромагнетикам относятся переходные металлы, железо, кобальт и никель, а также редкоземельные металлы, сплавы переходных металлов с редкоземельными, а также некоторые аморфные сплавы и ионные соединения. Практическое значение из ферромагнетиков имеют переходные металлы, а также некоторые их интерметаллические соединения, например железоникель, железо-кобальт. Намагниченность насыщения для ферромагнетиков обычно больше, чем для ферритов и составляет при температуре 293 К для железа, кобальта и никеля соответственно 1 717; 1 424 и 484 кА/м; точка Кюри – 1 043; 1 604 и 631 К, плотность соответственно $7,80 \cdot 10^3$, $7,87 \cdot 10^3$ и $8,8 \cdot 10^3$ кг/м³. По электрическим свойствам эти металлы являются проводниками [4].

Главным при разработке таких материалов является создание в зоне контакта разделительного слоя, препятствующего взаимодействию деталей узла трения. Данный слой могут формировать частицы металлов или металлосодержащие соединения, деформированные под действием контактных давлений и сдвиговых напряжений. Такие частицы способны изменить микрорельеф контактной зоны, заполняя микронеровности поверхностей трения и уменьшая тем самым величину контактного давления. При формировании металлоплакирующей пленки происходит ускорение переноса магнитоактивных частиц из объема смазки, что обеспечивает снижение износа, момента трения и повышение противозадирной стойкости узлов трения [5]. Активное влияние на кинетику формирования разделительных слоев оказывает состав смазочной среды. Полярные компоненты СМ обладают свойствами ПАВ и пластифицируют твердофазные частицы присадок, способствуя их передоформированию без разрушения. Металлоплакирующие СМ широко применяются в тяжело нагруженных узлах трения, т. к. способны формировать противозносные разделительные слои с высокой стойкостью к разрушению под действием контактных давлений и температур. Традиционно металлоплакирующие СМ содержат порошкообразные модификаторы дисперсностью от 10 до 100 мкм. Большой интерес представляют исследования триботехнических характеристик СМ с нанодисперсными частицами, т. к. в ряде работ установлены специфические особенности таких композиций, состоящие в повышении нагрузочно-скоростного диапазона применения, обеспечении проводимости контакта, снижении интенсивности коррозионно-механического изнашивания трибосистемы [3].

Физические основы и модель на основе наноприсадки магнитного действия

При введении магнитной присадки из частиц Fe_3O_4 и ПАВ на основе олеиновой кислоты (патент РФ № 2276681) СМ образует магнитный смазочный материал – магнитную жидкость (МЖ). Магнитный смазочный материал не изменяет своих свойств в течение длительного времени. Магнитные частицы не вызывают абразивного изнашивания пар трения, т. к. их размер значительно меньше минимального размера частиц, при котором появляется абразивный износ [4].

Магнитная жидкость – двухфазная коллоидная система твердых частиц диаметром d ферро- или ферримагнетика с жидкостной основой. Третья фаза в растворе – поверхностно-активная защитная оболочка толщиной δ на поверхности частиц, что показано на рисунке [6].

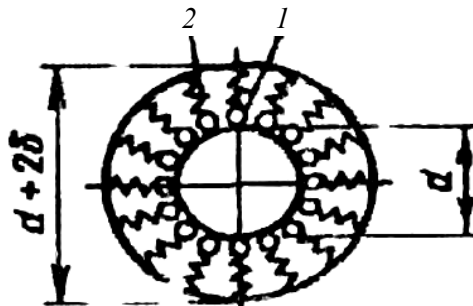


Схема строения частицы с оболочкой ПАВ в МЖ:

1 – полярная группа молекулы ПАВ; 2 – цепочная часть молекулы ПАВ

Магнитная жидкость устойчива при отсутствии коагуляции и седиментации частиц. Для выполнения первого условия необходимо, чтобы сближение частиц вызывало проявление сил отталкивания между ними, что возможно при наличии на поверхности частиц защитного адсорбционного слоя, образованного молекулами ПАВ. Для исключения седиментации применяют два метода: измельчение суспензии магнетика до коллоидных размеров частиц или конденсацию атомарных или молекулярных частиц.

Важно то, что оба указанных условия должны быть выполнены одновременно, т. е. защита частиц от коагуляции должна быть осуществлена в момент образования частиц. Это связано с тем, что трибологические параметры устройств с магнитной жидкостью в значительной степени зависят от процессов образования структуры из феррочастиц [7].

Агрегативная устойчивость коллоидных систем определяется балансом сил притяжения и отталкивания частиц, который описывается достаточно сложной теорией [6]. Основное условие устойчивости имеет вид

$$U \leq kT, \quad (1)$$

где U – полная энергия взаимодействия частиц; kT – энергия теплового движения частиц (k – постоянная Больцмана, T – температура).

Полная энергия U включает в себя энергию притяжения частиц за счет ван-дер-ваальсового взаимодействия; энергию магнитного диполь-дипольного взаимодействия во внешнем магнитном поле; энергию отталкивания, обусловленного действием защитных оболочек ПАВ на частицах и расклинивающим действием основы (носителя).

Анализ общего энергетического баланса агрегативной устойчивости позволяет сделать вывод о том, что образование агрегативно-устойчивых коллоидных растворов магнетиков возможно для частиц с $d \leq 10$ нм, покрытых слоем ПАВ толщиной $\delta \approx 2$ нм при объемной доле частиц $c_v \leq 0,2$.

Седиментационная устойчивость МЖ в поле сил тяжести определяется соотношением

$$\Delta\rho VqL \leq kT, \quad (2)$$

где $\Delta\rho$ – разность плотностей частицы и основы (жидкости); V – объем частицы; q – ускорение свободного падения; L – высота (толщина слоя жидкости, в котором доля частиц уменьшается по высоте в e раз по сравнению с их долей на дне сосуда).

В случае действия дополнительных сил (например, при центрифугировании) формулы (1), (2) следует модифицировать для учета зависимости ускорения частицы от соответствующей силы.

Результаты расчетов показывают, что гравитационная устойчивость МЖ надежно обеспечивается при $L \approx 10$ мм для частиц диаметром $d \approx 10^2$ нм [3].

Удерживать магнитный смазочный материал можно с помощью магнитного поля. Механизм управления заключается в следующем: магнитные частицы, устремляясь в зону с наибольшей напряженностью магнитного поля, увлекают за собой и жидкость-носитель. Если наибольшая величина магнитного поля будет в области зоны трения, то и магнитный смазочный материал будет находиться там же. При этом образуется так называемый картер, в котором будет находиться некоторый объем смазки. На открытых вращающихся поверхностях магнитная смазка будет удерживаться с помощью полей рассеивания. Таким образом, область трения будет смазываться жидкой смазкой и в то же время смазка будет удерживаться на вращающихся поверхностях, как удерживается пластичная смазка. Магнитное поле предпочтительнее создавать с помощью постоянных магнитов, что позволит не использовать громоздкие соленоиды, требующие внешних источников электрического тока [6].

Выводы

Введение наноприсадки магнитного действия позволяет:

1. Сохранить смазочные свойства СМ в течение длительного времени.
2. Обеспечить постоянное присутствие СМ в области зоны трения, что существенно уменьшит коэффициент трения.
3. Уменьшить интенсивность изнашивания.
4. Увеличить нагрузки, сохраняя при этом интенсивность изнашивания на уровне малых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д. И. Триботехника, конструирование, изготовление и эксплуатация машин. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 629 с.
2. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 344 с.
3. Люты М., Костюкович Г. А. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами // Трение и износ. – 2002. – № 4. – С. 411–424.
4. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
5. Теоретические основы использования пластичных смазок с ферромагнитными присадками в узлах трения / В. В. Михайлов, С. Н. Удодов, Д. А. Щербак и др. // Докл. Акад. воен. наук. – 2006. – № 6. – С. 60–66.
6. Орлов Д. В., Подгорнов В. Р. Магнитные жидкости в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 268 с.
7. Лапочкин А. И. Использование магнитных жидкостей в качестве смазки в мелкомодульных зубчатых передачах // Вестн. машиностроения. – 2002. – № 6. – С. 34–36.

Статья поступила в редакцию 8.02.2008

THE MECHANISM OF ACTION OF THE ANTIWEAR ADDITIVE ON THE MAGNETIC BASIS

A. P. Perekrestov, V. A. Nepomnyashchy

The classification of antiwear additives is given. The model of nanoadditives of magnetic action and one of the possible ways of its keeping in the friction zone are submitted; it essentially allows to keep lubricant properties of a lubricant for a long time, to reduce the friction factor and the intensity of wear process, to increase loadings, at the same time keeping the intensity of wear process at the level of small sizes.

Key words: lubricant, safety, durability, oil additives, ferromagnetic materials.