

КОРРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ, СМАЗАННОЙ МАГНИТНЫМ СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., Болотов М.И., 2024

Аннотация. Указано, что одним из основных показателей качества смазочных масел является их коррозионная активность по отношению к материалам поверхностей трущихся деталей. Отмечено, что в результате коррозии изменяются номинальные размеры деталей, микрогеометрия поверхностей, их химический состав и механические свойства (кроме этого, продукты коррозии изменяют состав масел и их физико-химические характеристики). Показано, что в магнитожидкостных подшипниках, которые находят все более широкое применение, процесс коррозии магнитным маслом может быть активирован магнитным полем. Установлено, что присутствие магнитного поля приводит к возрастанию концентрации поверхностно-активных молекул, вступающих в химическое взаимодействие с материалом поверхностей трения, и ускоряет их коррозионное разрушение.

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, коррозия, поверхностные эффекты, трение, износ.

CORROSION PROCESSES ON A SURFACE LUBRICATED WITH A MAGNETIC LUBRICANT

Abstract. It is indicated that one of the main indicators of the quality of lubricating oils is their corrosion activity in relation to the materials of the surfaces of rubbing parts. It is noted that as a result of corrosion, nominal dimensions of parts, microgeometry of surfaces, their chemical composition and mechanical properties change (in addition, corrosion products change the composition of oils and their physico-chemical characteristics). It is shown that in magnetofluidic bearings, which are increasingly being used, the corrosion process by magnetic oil can be activated by a magnetic field. It has been established that the presence of a magnetic field leads to an increase in the concentration of surface-active molecules that enter into chemical interaction with the material of friction surfaces and accelerates their corrosion destruction.

Keywords: magnetic lubricants, corrosion, surface effects, friction, wear.

Введение. В настоящее время на основе магнитных жидкостей создаются новые гибридные материалы с особыми функциональными свойствами для биомедицины, химической технологии, физических методов исследований [1, 2]. Особое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания узлов трения [3–6].

Все смазочные материалы содержат большое количество компонентов, химически активных по отношению к твердой поверхности [7–12]. Эти поверхностно-активные вещества (ПАВ) в основном вводятся в смазочный материал в качестве присадок для улучшения их функциональных свойств. Объемная концентрация присадок, которые, по сути, являются сильными ПАВ, в смазке составляет несколько процентов, но в отдельных случаях (например, в рассматриваемых смазочных магнитных маслах) может превышать 10 %.

Антифрикционные и противоизносные ПАВ вступают в химическое взаимодействие с поверхностью трения и вызывают их химическую коррозию. В результате изменяются как размерные, физико-химические, так и механические (из-за трансформации состава и структуры) характеристики поверхности. Это, как правило, негативно сказывается на работе узлов трения, если не иметь в виду режим управляемой коррозии при химической модификации поверхности с целью придания ей антифрикционных и противоизносных свойств.

Химическая коррозия, протекающая в процессе трения, имеет ряд особенностей, которые заключаются в следующем. Процесс коррозии развивается в условиях механической активации поверхности: знакопеременные напряжения в поверхностном слое достигают сотен мегапаскалей, а в местах динамического контакта микровыступов температура локально повышается на сотни градусов и может достигать температуры плавления. Продукты коррозии зачастую отделяются от трибоповерхности под влиянием сдвиговых напряжений и удаляются из зоны трения, благодаря чему облегчается доступ к поверхности новым химически активным молекулам.

Использование магнитных смазочных масел предполагает необходимость включения в конструкцию трибоузла магнитных систем для создания в зоне трения квазистационарного неоднородного магнитного поля, позволяющих регулировать трибопараметры узла [2, 12–14]. Для таких узлов трения определение степени влияния магнитного поля на процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта, представляет значительный научный и практический интерес. В то же время нельзя забывать, что нестационарные магнитные поля в соответствии с уравнениями Максвелла порождают электрические поля и токи, которые существенно изменяют интенсивность и вид коррозионных процессов.

Целью работы являлось исследование воздействия магнитного поля и сопутствующих им электромагнитных полей, а также электрических токов на коррозионные процессы в зоне фрикционного контакта, смазанного магнитным смазочным материалом.

Полуколичественное влияние магнитных и электромагнитных полей на коррозионные процессы в магнитоактивном фрикционном контакте. При смазывании магнитными маслами возможна коррозия

металлов пар трения, которая определяется развитием как химических, так и электрохимических процессов. Для большинства магнитных жидкостей стабилизатором дисперсных частиц служат органические кислоты, наиболее часто в этом случае используют олеиновую кислоту. Химическая коррозия заключается во взаимодействии их с металлами, приводящем к образованию солей этих кислот. В то же время в литературе [11] отмечается активирующее влияние механических напряжений в поверхностных слоях на коррозионные процессы. Аналогичное воздействие могут вызвать магнитострикционные напряжения, возникающие в материалах при трении под воздействием магнитного поля.

Технология приготовления магнитных масел не исключает попадания в их состав воды, растворения различных газов. Спектральными методами установлено содержание воды в магнитном масле на основе ПЭС-5 до 0,5 %, поэтому в трибосопряжениях возможно протекание электрохимической коррозии. Влияние магнитного поля на этот процесс может проявиться косвенно. Накладываемые на пару трения поля не являются однородными, поэтому при относительном движении одного из электропроводящих элементов возникают индукционные токи, которые могут протекать через фрикционный контакт и стимулировать электрокоррозию. В используемой машине трения МТП-М [14] существование таких токов было подтверждено осциллографическими исследованиями. Измеренное значение ЭДС индукции соответствовало расчетным значениям и достигало нескольких милливольт.

Для определения влияния электромагнитных полей на коррозионные процессы был выполнен приведенный ниже эксперимент. Цилиндрические образцы, аналогичные используемым в машине трения МТП-М, устанавливались торцевыми сторонами друг к другу с зазором около 1 мм и помещались в вазелиновое магнитное масло, содержащее олеиновую кислоту. Одну пару образцов подключали к источнику электрического тока с напряжением 4,5 В, на другую воздействовали магнитным полем так, чтобы между торцевыми поверхностями поле было неоднородным. Все образцы выдерживались в термостате при 100 °С в течение 30 ч.

На рис. 1 приведены микрофотографии поверхности исследуемых образцов с размытым из-за коррозии следом от внедрения геометрически правильной пирамиды Виккерса.

Сравнение трех частей рис. 1 показывает, что в присутствии электрических и магнитных полей коррозия протекает интенсивнее, причем влияние электрического поля существеннее. Об этом говорит то, что след от пирамиды размывается, поверхность становится более рыхлой и следы предварительной механической обработки на притирочном станке исчезают.

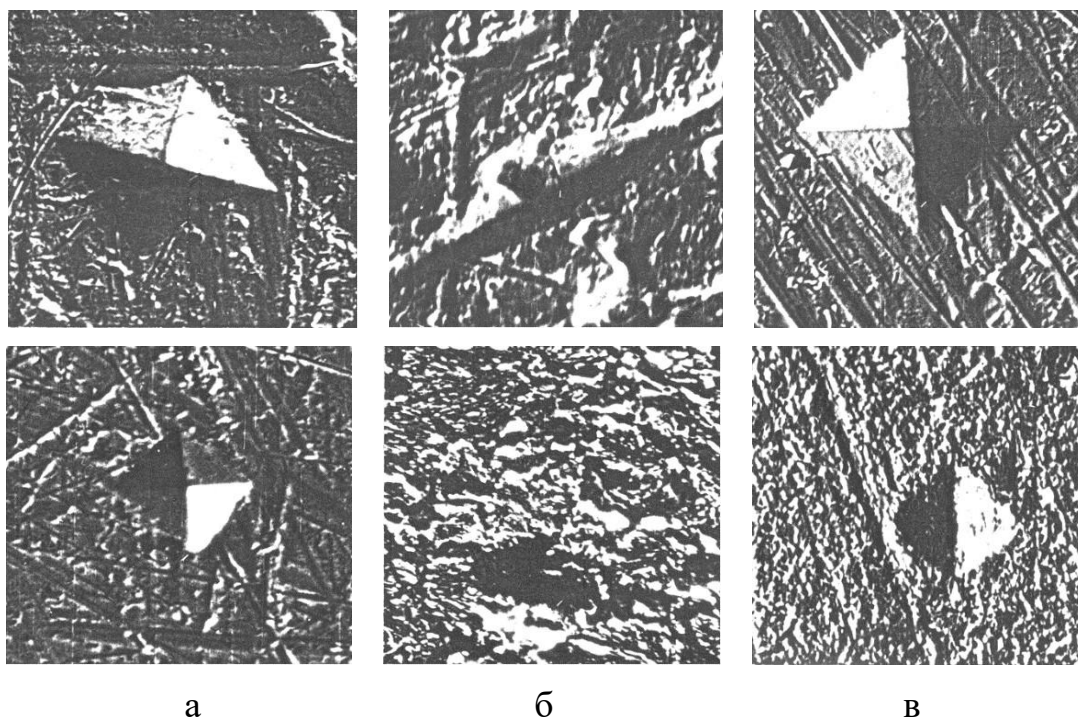


Рис. 1. Поверхность металлов (верхний ряд – бронза, нижний – сталь) после взаимодействия с немагнитным и магнитным вазелиновым маслом: а – без воздействия полей; б – после воздействия электрического поля; в – после воздействия магнитного поля

В электрическом поле коррозионные процессы интенсивно протекают как на поверхности цветного сплава, так и на поверхности стали (см. рис. 1). Согласно современным представлениям [18], электрический ток активирует поверхность, в частности облегчает выход дислокаций на поверхность. Действительно, изоляция пальчиковых образцов для разрыва электрической цепи индукционного тока приводила к уменьшению износа на уровне 5–7 %.

В магнитном поле (см. рис. 1в) коррозии более сильно подвержена поверхность стали. Скорее всего, это связано с тем, что в намагниченной стали возникают дополнительные микронапряжения в поверхностном слое, вызванные магнитострикционной деформацией.

Количественная оценка коррозионных свойств магнитных масел в условиях, отражающих реальные процессы в зоне трибоконтакта. Известные методы оценки коррозионной активности масел недостаточно полно учитывают условия ее протекания при трении и не дают количественного представления о динамике этого процесса. Метод «горячей проволоки» [15, 16] позволяет оценить только влияние температурных всплесков на коррозию при трении.

Апробированный нами метод исследований заключался в том, что коррозии в магнитном масле подвергалась металлическая нить (проволока), которая циклически нагревалась электрическим током, и в

ней создавались переменные растягивающие напряжения под действием силы Ампера. Известно, что именно растягивающие напряжения в поверхностях трения наиболее сильно влияют на коррозионно-механический износ [17]. Колебания нити способствуют ее быстрому охлаждению, частичному удалению продуктов коррозии и выравниванию концентрации ПАВ около ее поверхности. Объем слоя нити, вступившего в химическую реакцию, оценивается по изменению ее электрической проводимости (эти величины пропорциональны друг другу при неизменной длине нити). Используя такой метод, провели экспериментальные исследования значимости влияния температуры и механического состояния поверхности на коррозионные химические процессы в трибоузлах с магнитными нанодисперсными смазочными средами.

В качестве коррозионно-активных смазочных сред использованы трансмиссионное масло ТАД-17, кремнийорганическая жидкость ПЭС-5, магнитное масло на основе жидкости ПЭС-5 и магнитное масло, модифицированное 10%-й стеариновой кислотой. Опытные образцы, подвергнутые испытаниям на коррозию, были изготовлены из медной проволоки диаметром 0,075 мм. По образцам пропускались знакопеременные импульсы тока прямоугольной формы с амплитудой 2,9 А и периодом 0,2 с. Величина индукции однородного магнитного поля составляла 0,035 Тл. В образце действовали максимальные растягивающие напряжения $2,6 \cdot 10^7$ Па. Установка помещалась в термошкаф с температурой 370 К, расчетное повышение температуры нити составляло около 200 К. Продолжительность испытаний по рассматриваемому методу сравнительно небольшая (не превышает нескольких десятков часов).

При проведении эксперимента вначале к токопроводам в кювете припаивали концы медной проволоки (нити), обеспечивая центральный прогиб 1–2 мм. Кювету заполняли исследуемым смазочным материалом, задавали требуемые параметры магнитной системы и помещали в термошкаф. После замера начального сопротивления нити на нее подавали переменный ток и фиксировали текущие значения сопротивления проволоки через заданные промежутки времени. Активность коррозионных процессов оценивалась по относительному изменению сопротивления $\Delta R / R$ медной проволоки, поскольку $\Delta R / R \approx \Delta d / d$, где Δd – удвоенная толщина коррозионного слоя.

Учитывая относительно малую величину сопротивления медной проволоки, для его более точного измерения использовали четырехзондовую схему. При этом по двум проводникам через нить пропускали ток заданной величины, а с помощью двух других проводников измеряли напряжение на образце.

Результаты экспериментов, позволяющие оценить скорость коррозии медной проволоки в различных смазочных средах, представлены на рис. 2.

Условия испытаний: график 1 – без магнитного поля и тока; 2 – при пропускании тока; графики 3–6 – при пропускании тока и наложении магнитного поля. Экспериментальные точки соответствуют среднему значению изменения сопротивления по трем нитям. Из приведенных данных следует, что растягивающие напряжения в поверхности и ее температура существенно изменяют динамику коррозионного процесса и без учета этих факторов (то есть с использованием традиционных методик) получают заниженные значения скорости коррозии.

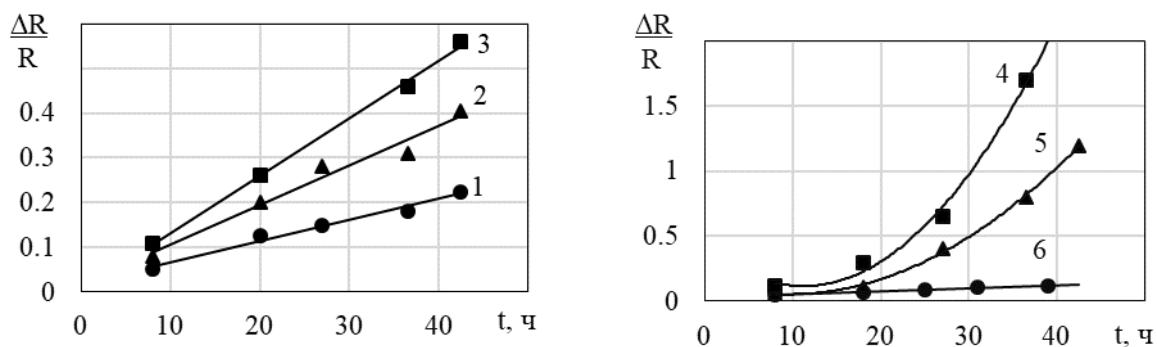


Рис. 2. Хронограмма коррозионной активности масел: 1–3 – ТАД-17; 4 – ПЭС-5; 5 – магнитного с 10%-й стеариновой кислотой; 6 – магнитного

Однозначно показано, что именно переменные температурные и деформационные воздействия на металл приводят к существенному изменению скорости коррозии. На основании проведенных опытов была выявлена одна из неочевидных причин возрастания скорости коррозии при деформации нитей, которая заключается в том, что на ее поверхности благодаря колебательным движениям не происходило отложение смолоподобных веществ, образующихся в масле при нагревании и препятствующих доступу к поверхности химически активных молекул масла (так же, как и при трении). Скорость коррозии меди в масле ТАД-17 в течение продолжительного времени почти не изменяется. Совершенно другая картина наблюдается в магнитном масле, содержащем в своем составе кремнийорганическую жидкость ПЭС-5 и стеариновую кислоту (10 % об.). Из рис. 2 (графики 5, 6) видно прогрессирующее увеличение скорости изменения сопротивления металлической нити. Такой ход кривых можно было бы объяснить ускорением коррозии, происходящим по мере уменьшения сечения нити из-за повышения растягивающих напряжений и температуры. Вероятно, это проявляется синергетическое действие химически активных компонентов магнитного масла, заключающееся в стимулировании образования в проволочке микротрещин и их развитии, то есть наблюдается проявление эффекта Ребиндера. Возможно, этим же отчасти объясняются и низкие противоизносные свойства.

При проведении продолжительных экспериментов был замечен эффект обрыва нитей. Если изучать именно это явление, то представляется возможным оценить многоцикловую усталость материалов в коррозионно-активной среде, что позволит прогнозировать скорость усталостного изнашивания материалов пары трения, работающих в среде масла.

Заключение. Влияние магнитного поля на процессы трения поверхностей, смазанных магнитным маслом, может быть многообразным. Значение всех магнитных эффектов для трения неодинаково, но и абсолютизировать какие-либо из них недопустимо, поскольку степень их влияния зависит от сочетания многих факторов, определяемых условиями трения. При выполнении проектирования магнитожидкостных узлов трения следует уделить особое внимание учету ряда особенностей трения в присутствии магнитного поля. Магнитное поле изменяет агрегативную устойчивость магнитных жидкостей и стимулирует образование крупных (в диаметре до нескольких микрометров) агломератов из магнитных частиц, которые вызывают абразивное разрушение поверхности и ухудшают ее микрогеометрию. Повышенная концентрация стабилизированных дисперсных частиц около зоны трения в присутствии магнитного поля приводит к возрастанию концентрации поверхностно-активных молекул, вступающих в химическое взаимодействие с материалом поверхности и вызывающих ее коррозионное разрушение. Магнитострикционные микронапряжения в поверхностном слое интенсифицируют этот процесс. При трении в магнитном поле трудно избежать появления индукционных электрических токов, протекающих через контакт и также способствующих коррозионному разрушению поверхностей трения.

Библиографический список

1. Odenbach S. Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications. Lecture Notes in Physics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 256 p.
2. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов [и др.]. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
3. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения / А.Н. Болотов [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 4. № 2 (20). С. 15–17.
4. Болотов А.Н., Горлов И.В. Восстановление изношенных поверхностей методом пластического деформирования // Механика и физика фрикционного контакта: межвузовский сборник научных трудов. Тверь: ТвГТУ, 2002. С. 39–43.

5. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Разработка модифицированной технологии получения наноструктурного магнитного масла // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2016. № 8. С. 69–75.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 150–158.
7. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
8. Uhlmann E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. V. 252. № 11. P. 336–340.
9. Байбуртский Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm> (дата обращения: 23.01.2024).
10. Мищак А. Трибологические свойства феррожидкости // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 3. С. 330–336.
11. Study on the synthesis and tribological property of Fe₃O₄ based magnetic fluids / Wei Huang [et al.] // Tribology Letters. 2009. Vol. 33. № 3. P. 187–192.
12. Ochoński W. Sliding bearings lubricated with magnetic fluids // Industrial Lubrication and Tribology. 2007. V. 59. № 6. P. 252–265.
13. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел / А.Н. Болотов [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 8 (205). С. 361–365.
14. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Васильев М.В. Критерий перехода к пластическим контактным деформациям в тяжело-нагруженных узлах трения деталей машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С. 211–213.
15. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты. М.: Химия, 1988. 488 с.
16. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р.М. Матвеевский [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
17. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
18. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.