

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ И СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНОГО МАГНИТНОГО МАСЛА

А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо, В.В. Новиков, О.О. Новикова
ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, д.22
alnikbltov@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрено воздействие магнитного поля на структуру и свойства смазочных материалов. Обнаружен магнитотрибологический эффект. Установлено, что в результате воздействия на магнитное масло однородных полей противоположные свойства масла ухудшаются.

Ключевые слова: магнитное масло, дисперсионная среда, нанодисперсные частицы, трение, износ, магнитотрибологический эффект.

Магнитное наноструктурное смазочное масло находит все более широкое применение в перспективных узлах трения для космической, авиационной и вычислительной техники [1-3]. Для управления движением магнитного смазочного материала используются специально созданные магнитные поля определенной топографии. Внешнее магнитное поле, кроме основной функции – организации процесса перемещения масла, может косвенно или непосредственно влиять на процессы контактного взаимодействия.

Воздействие магнитных полей на структуру и свойства веществ в жидком состоянии изучалось в работах [4, 5] в связи с изменением смазывающих и смачивающих свойств, а также условий кристаллизации жидкостей после магнитной обработки. В нашем случае можно выделить три эффекта, приводящих к изменению свойств жидкостей, выполняющих роль дисперсионной среды магнитного масла.

Во-первых, изменение полярности молекул вследствие расщепления энергетических уровней атомов [6].

Во-вторых, структурирование жидкости и макроперераспределение компонентов [7]. Структурирование объясняется действием на магнитоанизотропные молекулы вращающего магнитного момента

$$M = \frac{1}{2} \Delta\chi\mu_0 H^2 V \sin 2\alpha,$$

где $\Delta\chi$ – разность магнитных восприимчивостей в параллельном и перпендикулярном к оси молекулы направлении, H – напряженность магнитного поля, V – объем, занимаемый молекулой, α – угол между осью молекулы и направлением поля. Перераспределение компонентов происходит в жидкостях, имеющих молекулы с различной магнитной восприимчивостью и находящиеся в неоднородном магнитном поле. В

этих условиях наблюдается магнитостатическая сепарация молекул под действием силы

$$F = \frac{1}{2} \chi \mu_0 V \text{grad} M^2,$$

где χ – магнитная восприимчивость молекул.

В-третьих, дополнительная энергия молекул в магнитном поле изменяет характер сольватных комплексов внутри жидкости и на межфазной границе [5].

Перечисленные эффекты должны влиять на поляризуемость жидкой основы масел и поглощение электромагнитного излучения. Поэтому значимость их оценивалась методами диэлкометрии и ИК-спектроскопии. Исследовался большой набор органических и синтетических сред, используемых для изготовления магнитных масел: ТАД-17, И-20, ВКЖ-96, ПЭС-5, глицерин и др.

Диэлектрические свойства измерялись с помощью прибора Е8-4 на частоте 1 кГц в однородных полях относительно большой напряженности – до 1,2 МА/м и неоднородных полях с градиентом до 40 МА/м². Силовые линии электрического и магнитного полей были коллинеарны для того, чтобы исключить побочный эффект, вызванный действием силы Лоренца на движение ионов, небольшое количество которых всегда содержится в масле. Температура масла поддерживалась постоянной, время магнитообработки доходило до 12 часов.

Спектры поглощения веществ в инфракрасной области снимались на приборе "Spesord" непосредственно после выдержки масла в поле напряженностью 170 кА/м в течение 100–150 часов. Все измерения проводились с большой тщательностью и многократно повторялись.

Результаты диэлкометрических исследований не позволяют говорить о каком-либо существенном изменении поляризуемости молекул масел в магнитном поле (по крайней мере с точностью до 0,1%). Наблюдалось некоторое изменение тангенса диэлектрических потерь после длительной выдержки в поле. Например, для вазелинового масла с добавками олеиновой кислоты изменение составило 2–4%, и было одним из самых значительных. Этот результат несомненно связан с влиянием наведенной магнитным полем анизотропии в расположении молекул в области ИК-спектра. Изменения в поглощательной способности масел не проявились.

Предполагаемое магнитосепарационное перераспределение молекул по объему вещества электроспектральными методами не обнаружено. С молекулярно-кинетических позиций результат не вызывает сомнения, поскольку для молекул масел показатель степени в больцмановском распределении значительно меньше единицы.

Из вышеизложенного нельзя сделать вывод о каком-либо существенном изменении отдельных физико-механических и химических свойств жидкости носителя магнитного масла при воздействии магнитного поля. Экспериментально оценивалось интегральное воздействие магнитного поля на процесс трения поверхностей, смазанных традиционными немагнитными маслами. Исследования проводились на торцевой машине трения [8] в масляной ванне, при скорости скольжения до 1 м/с и давлении на контакте до 2 МПа. В зоне трения электромагнитом создавалось однородное магнитное поле для исключения индукционных токов через контакт и скапливания частиц износа. В процессе исследований фиксировался момент трения, износ измерялся профилографическим методом после испытаний.

С точностью до 3% отклонений среднего значения момента трения при включении магнитного поля не происходило, хотя характер его несколько менялся. Повышение объемной температуры до 360 К не привело к каким-либо ощутимым изменениям трения в магнитном поле. Это подтверждает справедливость сделанного в работах [9] заключения о слабом влиянии на трение гальваномагнитных эффектов, роль которых зачастую абсолютизируется [10]. Анализ результатов двадцати четырех опытов на изнашивание не показал какой-либо корреляционной связи величины износа с воздействием магнитного поля.

Магнитные смазочные масла, в отличие от традиционных, содержат сильномагнитные дисперсные частицы, энергия которых в магнитном поле сравнима с тепловой энергией. Поэтому в неоднородном магнитном поле возможно перераспределение их содержания по объему вещества [8]. Степень перераспределения частиц достаточно просто оценить по локальному изменению намагниченности насыщения вещества, которая пропорциональна объемному содержанию магнитной фазы.

Приведенные в работе [8] данные показывают, что перераспределение содержания магнитной фазы в масле может оказаться существенным и процесс перехода к равновесному распределению протекает наиболее интенсивно в первые часы после включения поля.

Выполненный с помощью электронной микроскопии, фракционный анализ масла, показал, что магнитные дисперсные частицы перераспределяются в объеме масла по концентрации, и по размерам. В слоях с более высокой напряженностью поля преобладают более крупные частицы и их агломераты.

Следует отметить, что прогнозировать поведение дисперсных частиц в неоднородном поле на основании распределения Больцмана не всегда правомерно, поскольку в нем не учтено дипольное взаимодействие частиц. Как следует из опытных данных [8], отклонение от распределения

Больцмана усиливается при увеличении дисперсности частиц, разброса по дисперсионному составу и теоретически трудно предсказуемо.

В узлах трения приповерхностное повышение концентрации дисперсных частиц может происходить не только под влиянием внешних полей, но и полей, возникающих на ферромагнитных поверхностях в месте выхода междоменных границ или в том месте, где наблюдается скачек нормальной составляющей намагниченности.

Указанное перераспределение частиц в масле, конечно же, негативно влияет на износостойкость узла трения и особенно это сказывается в начале работы узла, находившегося до этого продолжительное время в состоянии покоя.

Проведенные эксперименты позволили обнаружить новый магнитотрибологический эффект, который заключался во влиянии на смазочные свойства масла однородного магнитного поля. Оказалось, что в результате воздействия на магнитное масло даже относительно слабых однородных полей с напряженностью около $2 \cdot 10^3$ А/м противоизносные свойства масла ухудшаются. С увеличением напряженности поля эффект проявляется сильнее. Причина заключается в том, что поле снижает агрегативную устойчивость магнитного масла. В магнитном поле усиливается диполь – дипольное взаимодействие частиц и происходит их частичная флокуляция. Образующиеся агломераты частиц вызывают абразивный износ поверхностей. Размеры агломератов достигают нескольких микрон и поэтому легко могут быть обнаружены с помощью оптического микроскопа при наблюдении тонкого слоя масла в проходящем свете.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-08-97500).

Библиографический список:

1. **Bolotov, A.N.** Magneto-liquid sliding bearings / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, V.G. Pavlov // Journal of Friction and wear. – 2004. – V. 25. – № 3. – P. 286-291.
2. **Болотов, А.Н.** Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 9. – С. 38-41.
3. **Болотов, А.Н.** Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 10. – С. 23-29.
4. **Аксенов, А.Ф.** Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях / А.Ф. Аксенов. – М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.
5. **Класин, В.И.** Омагничивание водных систем / В.И. Класин. – М.: Химия, 1978. – 130 с.

6. **Туркова, Н.Н.** Влияние магнитного поля на свойства реактопластов / Н.Н. Туркова, Т.В. Лавская // Электротехническая промышленность. Серия электротехнические материалы: научно-технический сборник. – 1982. – Вып. 4. – С. 1-2.
7. **Кестельман, В.Н.** Физические методы модификации полимерных материалов / В.Н. Кестельман. – М.: Химия, 1980. – 224 с.
8. **Болотов, А.Н.** Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2008. – 124 с.
9. **Бернштейн, М.П.** Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М.П. Бернштейн, В.Н. Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с
10. Магнитная обработка режущего инструмента и дальнейшие перспективы развития этого метода / под ред. С.Н. Постникова. – М.: ВДНХ СССР, 1978. – 32 с.