

Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения

д.т.н. проф. Болотов А.Н., к.т.н. доц. Новиков В.В., к.т.н. доц. Новикова О.О.,
к.т.н. доц. Горлов И.В.
ТвГТУ

8(4822) 52-49-71, alnikbltov@rambler.ru

Аннотация. Исследованы временные зависимости структурной стабильности перспективных магнитных масел и предложены критерии для ее оценки.

Ключевые слова: магнитное масло, структурная стабильность, трение, износ.

Использование современных магнитных масел (ММ) в узлах трения высокотехнологичного оборудования существенно повышает его работоспособность, точность и энергоэффективность [1, 2, 3, 4]. Однако, ММ находятся под воздействием достаточно сильного магнитного поля, вызывающего агрегирование магнитных частиц и их последующую седиментацию [1]. Эти процессы снижают триботехнические свойства подшипников [3, 4] и обуславливают необходимость проведения исследований коллоидной устойчивости высокотехнологичных магнитных масел и магнитных жидкостей в неоднородном магнитном поле, а также для определения факторов, влияющих на их структурную стабильность.

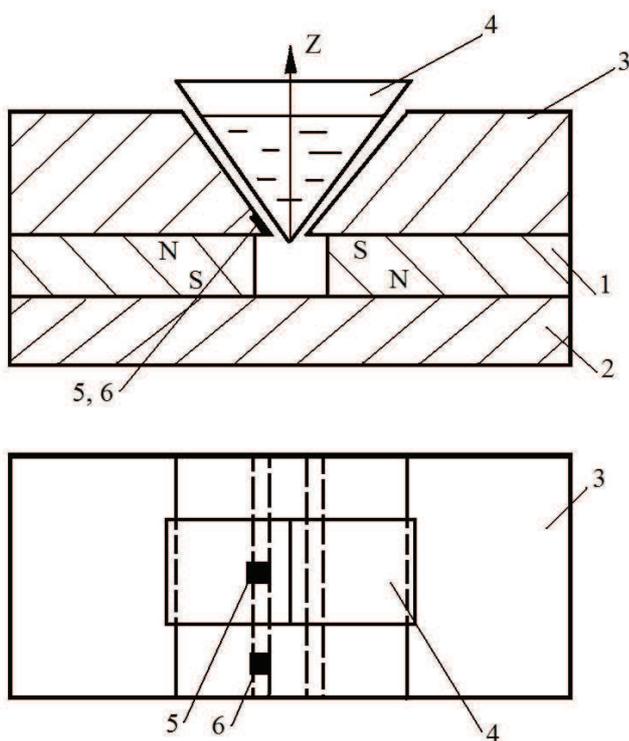


Рисунок 1. Принципиальная схема прибора для исследования структурной стабильности магнитных масел

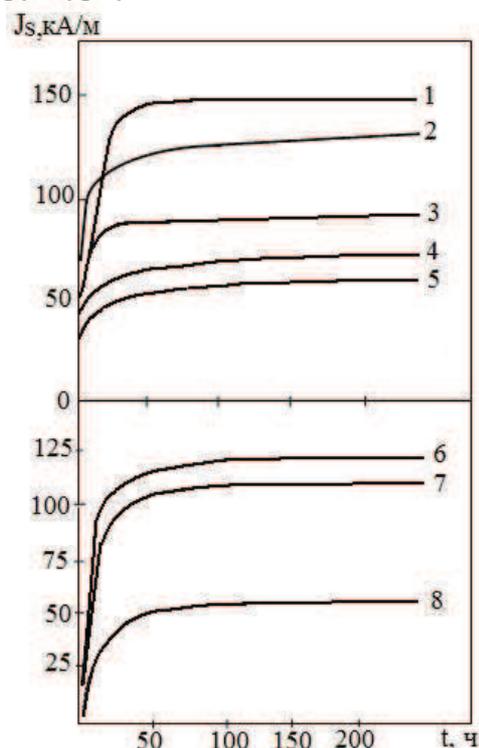


Рисунок 2. Устойчивость магнитных жидкостей ($\nabla H = 3,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$) на основе: 1 – тетрадекана; 2 – турбинного масла; 3 – ПЭС-В-2; 4 – ПЭС-5; 5 – ПОМ; 6 – ДБС; 7 – ДОС-1; 8 – ДОС-2

Принципиальная схема прибора для проведения исследований показана на рисунке 1. Прибор состоит из источника постоянного магнитного поля – двух постоянных магнитов в виде параллелепипеда 1 из сплава Sm-Рo, замыкающего поле магнитопровода в виде пласти-

ны из магнитомягкой стали 2, двух магнитопроводов 3 из этой же стали, создающих неоднородное магнитное поле в зазоре клиновидной формы (угол клиновидности 120°). В зазор помещается кювета 4 с исследуемым магнитным маслом. Индукция магнитного поля в магнитной среде измеряется с помощью датчиков Холла 6, толщина которых менее 0,5 мм. Разность сигналов поступающих с преобразователей 5 и 6 пропорциональна величине намагниченности масла. Коэффициент пропорциональности устанавливается тарированием датчиков в фиксированном поле. Нижняя часть кюветы устанавливается в области, соответствующей максимальной величине поля и наибольшей его неоднородности. Из-за конечности размеров преобразователей Холла измерялась средняя намагниченность на высоте слоя жидкости, равного 0,15 мм.

Структурная устойчивость масла определяется следующим образом. В кювету помещается ММ в таком объеме, чтобы его внешняя граница практически выходила за пределы поля, и замеряется исходная намагниченность. Под действием неоднородного магнитного поля происходит перераспределение дисперсных частиц в объеме магнитного масла. Наибольшая концентрация частиц образуется в нижней части кюветы, там же неоднородность поля и его абсолютное значение максимальны. Измеряя намагниченность ММ в этой точке, можно проследить динамику перераспределения феррочастиц. Скорость нарастания намагниченности характеризует степень седиментационной устойчивости ММ. Поскольку неоднородность поля уменьшается по высоте клиновидного зазора, то, приподнимая кювету, можно проверить устойчивость ММ в менее однородных полях. Для контроля намагниченности кювету в данном случае следует кратковременно опускать в исходное положение.

Полученные кривые изменения намагниченности J_S от времени нахождения в магнитном поле имеют ожидаемый вид с участком, где намагниченность стремится к насыщению (рисунок 2). Быстрое нарастание намагниченности на начальном участке объясняется перераспределением в магнитном поле крупных агломератов из феррочастиц, которые всегда присутствуют в масле по технологическим причинам. Магнитная сила, действующая на них в неоднородном магнитном поле, превышает силу внутреннего трения, замедляющую их движение, поэтому намагниченность растет с относительно высокой скоростью. Быстрота нарастания намагниченности на первом участке определяется коэффициентом вязкости дисперсионной среды. На следующем временном участке рост намагниченности происходит из-за броуновского перераспределения отдельных наночастиц во внешнем градиентном магнитном поле.

Если агломераты из состава магнитной жидкости предварительно отфильтровать, например, с помощью гравитационной или магнитной сепарации, то скорость нарастания намагниченности замедляется. Однако магнитная и гравитационная сепарация подходят не всегда, так как даже в небольших по величине магнитных полях начинают формироваться новые агломераты. При возрастании неоднородности магнитного поля агрегативная устойчивость магнитных масел ухудшается.

С практических позиций наиболее важной характеристикой является равновесная намагниченность $J_{НС}$, которая устанавливается в магнитном масле через несколько часов после включения магнитного поля. Отметим, что чем выше установившаяся намагниченность магнитного масла, тем более значительной становится абразивная составляющая интегрального износа поверхности смазанной магнитным маслом. Равновесная намагниченность, которая определена в результате проведенных экспериментов, получена в полях с максимально применяемой неоднородностью для технических устройств, поэтому найденные значения $J_{НС}$ стремятся к предельным.

Если после установления равновесной намагниченности выключить магнитное поле, то происходит релаксация намагниченности, которая обычно не превышает нескольких процентов. Поэтому можно утверждать, что магнитное масло в полях с величиной градиента $|\nabla H| > 4 \cdot 10^8$ А/м² скорее всего потеряет седиментационную устойчивость. Расстояние между

магнитными частицами уменьшается настолько, что происходит их необратимая агломерация.

Проведенные исследования зависимости равновесной намагниченности от вязкости среды показали их обратную зависимость: чем выше равновесная намагниченность, тем ниже вязкость среды. Можно предположить, что в магнитном поле между феррочастицами образуются достаточно большие полости с дисперсионной средой, и маловязкая среда удерживается значительно слабее.

Применение стабилизатора существенно меняет зависимость $J_{НС}$ вязкости среды. Приведенные на рисунке 2 реологические зависимости изменения намагниченности 7 и 8 построены для двух масел на основе диэфира. В одном магнитном масле феррочастицы стабилизированы жирной кислотой, а другое содержит частицы с полимерными оболочками, синтезированными из олигоэфира. Притом, что величина вязкости дисперсионной среды практически одинакова, равновесная намагниченность масел отличается почти в 2 раза.

В процессе исследований определено влияние неоднородности магнитного поля на величину равновесной намагниченности. Как и следовало ожидать из общефизических соображений, равновесная намагниченность уменьшается при снижении градиента неоднородности поля.

Для характеристики структурной устойчивости магнитных масел предложено использовать критериальную величину ω , равную отношению намагниченности однородной исходной магнитной жидкости $J_{ОС}$ к равновесной намагниченности $J_{НС}$ в однородном магнитном поле: $\omega = J_{ОС}/J_{НС}$. Наиболее устойчивыми являются ММ и жидкости, у которых значение ω приближается к единице, в частности, жидкости на основе ПЭС-5, ПОМ, ДОС.

В результате проведенных исследований был получен критерий, определяющий степень неоднородности поля, который для испытуемых магнитных масел составил $|\nabla H_k| = 5 \cdot 10^7$ А/м². Этот же критерий определяет область оптимальной работоспособности ММ: когда магнитное поле в трибоузлах не превышает критического, не происходит агломерация масла, и соответственно, не наблюдается ощутимое абразивное изнашивание поверхностей трения.

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

Литература

1. 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. 27 - 32.
2. Bolotov, A. N. Magneto-liquid sliding bearings / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, V. G. Pavlov // Friction and wear. 2004. V. 25. № 3. С. 286 - 291.
3. Болотов, А.Н. Трение структурированной магнитной жидкости при скольжении по твердой поверхности / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и износ. 2006. V. 27. № 4. С. 409-416.
4. 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. 76-82.