УДК 621.892 *Оригинальная статья*

Некоторые особенности влияния на трение и износ структурных компонентов нанодисперсного магнитного смазочного масла

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, Россия, Тверская обл., Тверь, наб. А. Никитина, 22
alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.585

Аннотация: Для узлов трения эксплуатирующихся в условиях отсутствия технического обслуживания, при значительно ограниченной зоне смазки, одним из оптимальных решений является использование нанодисперсных магнитных смазочных масел. Исследовано влияние структурных компонентов нанодисперсного магнитного смазочного масла: магнитной фазы, твердосмазочной фазы, противоизносных присадок на его трибологические свойства. Установлено наличие оптимальной концентрации ферромагнитных наночастиц при износе поверхностей с относительно низкой микротвердостью. Это обусловлено изменением процессов в зоне трения: эффект упрочнения сменяется абразивным износом. Для твердых поверхностей износ носит преимущественно абразивный характер. Учитывая, важность, удержания смазочной пленки магнитного масла в зоне контакта, проанализировано поведение ферромагнитных наночастиц в градиентном магнитном поле. Установлено перераспределение частиц в силовом поле и увеличение количества частиц у поверхности исследуемого образца. Это приводит к росту скорости образования смазочной пленки на поверхности трения и снижению силы трения на 10-15% для относительно невысоких скоростей скольжения поверхностей. Оценка влияния исследуемых присадок на структуру и физико-механические свойства магнитных наномасел показала сложный характер изменения их свойств при натурных испытаниях. Для повышения антифрикционных характеристик магнитных масел необходимо применять в 3-4 большее количество присадки по сравнению с традиционным маслом. Установлено, что испытанные твердосмазочные наполнители положительно влияют на фрикционные свойства магнитного трибоузла, но их количество должно быть существенно ограниченно, во избежание потери управляемости магнитным полем.

Ключевые слова: нанодисперсное магнитное масло, трибосвойства магнитных масел, ферромагнитные наночастицы, противоизносные присадки, антифрикционные наполнители, трение, износ.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новиков Владислав Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Original paper

Some features of the influence of nanodispersed magnetic lubricating oil on friction and wear of structural components

A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova
Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.585

Abstract: For friction units operated under conditions of no maintenance, with a significantly limited lubrication zone, one of the optimal solutions is the use of nanodispersed magnetic lubricating oils. The effect of the structural components of nanodispersed magnetic lubricating oil: magnetic phase, solid lubricant phase, antiwear additives on its tribological properties was studied. The presence of an optimal concentration of ferromagnetic nanoparticles during wear of surfaces with relatively low microhardness was established. This is due to a change in processes in the friction zone: the hardening

effect is replaced by abrasive wear. For hard surfaces, wear is predominantly abrasive. Considering the importance of retaining the lubricating film of magnetic oil in the contact zone, the behavior of ferromagnetic nanoparticles in a gradient magnetic field was analyzed. Redistribution of particles in the force field and an increase in the number of particles near the surface of the sample under study were established. This leads to an increase in the rate of formation of a lubricating film on the friction surface and a decrease in the friction force by 10-15% for relatively low sliding speeds of surfaces. Evaluation of the effect of the studied additives on the structure and physical and mechanical properties of magnetic nanooils showed a complex nature of changes in their properties during full-scale tests. To improve the antifriction characteristics of magnetic oils, it is necessary to use 3-4 times more additives than traditional oil. It was found that the tested solid lubricant fillers have a positive effect on the friction properties of the magnetic tribological unit, but their amount should be significantly limited to avoid loss of controllability of the magnetic field.
Keywords: nanodispersed magnetic oil, triboproperties of magnetic oils, ferromagnetic nanoparticles, antiwear additives, antifriction fillers, friction, wear.

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4054-5550
Vladislav V. Novikov – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0001-5670-1250
Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4133-3541

Поступила в редакцию/received: 15.05.2025; после рецензирования/revised: 08.06.2025; принята/accepted 18.06.2025.

1. Введение

В аэрокосмическом машиностроении, точном станко- и приборостроении применяются узлы трения, требующие применения нетрадиционных смазочных материалов. Это могут быть трибосопряжения, эксплуатирующиеся в условиях дефицита смазочного материала, длительного, или полного отсутствия технического обслуживания, а также узлы со значительно ограниченной зоной смазки. В этом случае оптимальным решением является использование магнитных смазочных материалов, и, в частности, нанодисперсных магнитных смазочных масел (МСМ) [1-4]. Внешнее магнитное поле, реализуемое конструкцией узла, удерживает жидкости с ферромагнитными частицами в зоне трения, восстанавливает смазочную пленку, выдавленную из зоны контакта, и предотвращает ее утечку [3]. Сравнительные испытания трибосвойств традиционных и магнитных смазок показывают их сопоставимый уровень, а также возможность получения более низкого трения в конкретных узлах при использовании магнитных смазочных материалов [1, 2]. Однако у МСМ имеется ряд недостатков, так, например у некоторых ограничена температурная стабильность, могут проявляться сложные магнитогидродинамические эффекты при трении, возможно появление агломератов из ферромагнитных частиц негативно влияющих на изнашивание поверхностей трения [4].

Улучшить физико-химические и триботехнические свойства магнитных смазочных масел, по нашему мнению, можно путем

добавления в их состав присадок, оптимальным использованием нанодисперсной магнитной фазы, и добавкой еще одной дисперсной фазы из антифрикционных частиц. Для традиционных смазок применение присадок и антифрикционных наполнителей с целью модификации их трибологических свойств известно [5-8]. Было установлено [7], что микро- и наноразмерные углеродистые твердые добавки в масло способствуют снижению коэффициента трения, скорости износа и увеличению несущей способности смазки. Имеются данные о снижении трения и улучшении противоизносных свойств базового масла из полиалкиленгликоля при применении наночастицы дисульфида молибдена MoS_2 [6] и о сравнении фрикционных свойств масла при добавлении графита и MoS_2 [8].

Для МСМ одним из факторов, определяющих его трибологические свойства является нанодисперсная магнитная фаза [2, 4, 9-11], значительное влияние оказывает массовая доля твердого вещества магнитных наночастиц в смазочном масле [2] и размер магнитных частиц [9]. Более подробный анализ процессов, происходящих в зоне фрикционного контакта при воздействии твердых магнитных частиц, особенно при приложении внешнего магнитного градиентного поля позволит целенаправленно менять трибологические характеристики узла трения.

Имеются единичные исследования, посвященные попыткам улучшить трибосвойства магнитных масел путем добавки дисперсной фазы из антифрикционных немагнитных частиц углерода [12, 13] и дисульфида молибдена [14] микро- и наноразмеров. В этих работах получены некоторые положительные результаты по снижению трения магнитных смазок. Представляет практический интерес получение и испытание фрикционных свойств МСМ отечественного производства, модифицированных твердосмазочными наполнителями.

Целью исследования являлось установление взаимосвязи между структурными компонентами нанодисперсного магнитного смазочного масла, такими как магнитная фаза, твердосмазочная фаза, противоизносные присадки и его трибологическими свойствами.

2. Методы исследований и материалы

Триботехнические характеристики МСМ оценивались по результатам испытаний на машинах трения МТШ-М и МТП-М [15]. Конструкция приборов позволяет создавать и поддерживать магнитное поле с высокой аксиальной симметрией в испытуемом узле. Давление в зоне контакта 2-7 МПа реализовано на установке МТП-М при схеме трения торец цилиндра – плоскость (линейная скорость скольжения 0,24 м/с). Более высокое контактное давление 1-2 ГПа обеспечивала схема

трения шар – плоскость в установке МТШ-М (линейная скорость скольжения 0,32 м/с). Трибоузлы испытывались в граничном режиме трения при температуре 20-25°С. Материалы исследуемых пар трения сталь ШХ15, сталь 3, сталь 20, сталь У10А, бронза, медь, латунь.

Частицы магнитной фазы изготавливались из магнетита, методом химической конденсации [16], имели в основном форму близкую к шарообразной. Учитывая, что средний диаметр частиц около 10 нм, можно считать, что каждая из них соответствует одному домену.

Исследовались коллоидностабильные нанодисперсные магнитные смазочные масла. Для стабилизации использованы кремнийорганические кислоты (МСМ4), ионогенные ПАВ (МСМ5), вещества, образующие полимерную оболочку вокруг частиц (МСМ6), жирные кислоты (МСМ7), содержащие в качестве дисперсионной среды жидкость ПЭС-5 и дисперсную фазу из железа. Изменяя состав магнитных смазочных материалов, можно управлять их смазочными характеристиками. Представляет интерес исследование соотношения присадки в МСМ в свободном и связанном состоянии, для чего была выбрана присадка МК-01. Также в магнитное смазочное масло добавлялись наполнители и присадки, такие как графит, дисульфид молибдена, ДФ-11, Алфанокс, Моливан, ИХОС. Поверхности трения контактирующей пары материалов исследовались до и после испытаний на дифрактометре Rigaku Ultima.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Дисперсные частицы. При работе триботехнических опор в большинстве количестве случаев происходит изнашивание поверхностей, в результате которого частицы износа в дальнейшем попадают в смазочный слой и затем участвуют непосредственно в процессах трения, которые описаны в ряде исследований [17, 18]. Показаны различные сценарии происходящих процессов при этом: возможно увеличение интенсивности изнашивания, изменение нагрузки при которой возможно заедание поверхностей, при начальном этапе работы подшипниковых опор меняется время приработки поверхностей. Также меняется контактное давление из-за увеличения площади фактического касания, на которую влияет наличие в смазочном слое множества мелких дисперсных частиц.

Как установлено, процессы трения при наличии дисперсных частиц в смазке во многом зависят от соотношения их размера и размера микровыступов поверхностного слоя. Многие исследования были посвящены влиянию на трение и износ твердых дисперсных частиц, размеры которых соизмеримы или больше размеров микровыступов. В нашем случае размер частиц примерно на 2 порядка меньше размеров микровыступов. Это приводит к тому, что толщина граничного смазочного

слоя, возникающая при трении, примерно соответствует размерам частиц МСМ.

Было экспериментально изучено изнашивание поверхностей при различной концентрации дисперсной фазы. Поверхности смазывались двухкомпонентным маслом, состоящим из триэтаноламина и частиц магнетита, что позволило исключить влияние на трение ПАВ-стабилизатора. Результаты опытов приведены на рис. 1. Показаны зависимости диаметра пятна износа d на шариковом образце и суммарная интенсивность линейного износа цилиндрического образца и поверхности J_h в зависимости от концентрации нанодисперсной магнитной фазы C. Ход кривых показывает качественно различное влияние дисперсной фазы на износ относительно мягких (см. рис. 1 а) и твердых (см. рис. 1 б) и поверхностей.

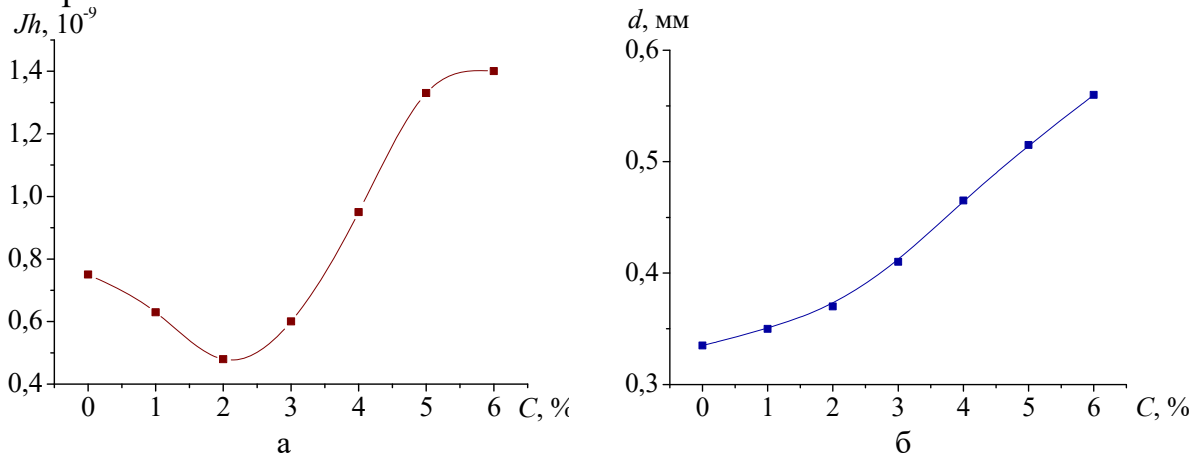
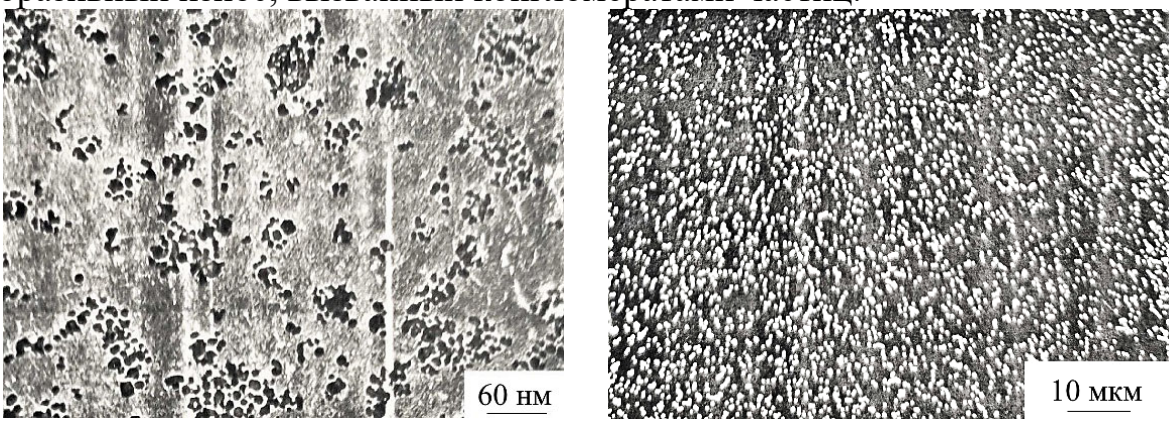


Рис. 1. Зависимость характеристик изнашивания от содержания в магнитном масле дисперсной фазы при трении. Материалы трения: а – Ст3 – бронза, б – ШХ15 – ШХ15.

Для относительно мягких поверхностей наблюдается минимальное значение износа при концентрации частиц около 2 масс.% (см. рис. 1 а). Аналогичные результаты получены при парах трения Ст. 3-медь. Анализ полученных зависимостей позволяет предположить, что при трении происходят два конкурирующих процесса. Мелкие частицы магнетита (см. рис. 2 а) могут в первом случае внедряться в поверхность трения, во втором под действием адгезии закрепляться на ней. Все это приводит к определенному повышению прочности поверхности и снижению износа. С другой стороны частицы испытывают некоторое притяжение между собой в результате которого образуются конгломераты из них. Кроме этого, они, находясь в свободном состоянии в зоне граничного трения, разрушают слой смазочной пленки и тем самым увеличивают адгезию трущихся поверхностей между собой. В результате этого процесса увеличивается износ. Если сравнивать влияние указанных процессов между собой, то можно отметить, что упрочнение поверхности оказывает более значительное влияние при концентрациях наночастиц менее 2% (см.

рис. 1 а). При дальнейшем увеличении концентрации частиц доминирует абразивный износ, вызванный конгломератами частиц.



а б

Рис. 2. Микрофотография магнитных частиц (а) и поверхности трения латуни в излучении $FeK\alpha$ (б).

Физико-химическими методами анализа было подтверждено внедрение частиц магнетита в поверхность и прилипание к ней. В качестве магнитного смазочного масла было использовано кремнийорганическое масло МСМ7. Давление при испытании составляло 4,2 МПа. Относительная скорость скольжения – 0,24 м/с. Содержание магнитных частиц в масле – 5%. Для исследований были выбраны образцы из латуни (микротвердость 2 ГПа) и меди (микротвердость 1,3 ГПа). Образцы терлись по поверхности контртела из бронзы марки ОСЦ-4-4-2,5. Установлено, в первом материале содержание ферромагнитных частиц после испытаний было 0,7%, а во втором 1,7%. На рис. 2 показана поверхность латуни в оптическом излучении (а), в излучении $FeK\alpha$ (б). Видны частицы магнетита в поверхности латуни.

В ходе дальнейших исследований было подтверждено упрочнение поверхности образцов при трении в магнитном смазочном масле. На первом этапе осуществлялась приработка поверхностей трения, после этого проводилось измерение интенсивности изнашивания. На втором этапе в качестве смазочного материала было использовано масло не содержащее феррочастиц, при этом постоянно осуществлялся контроль интенсивности изнашивания. В результате установлено, что в начале второго этапа испытаний она соответствовала первому этапу, затем возрастала, что свидетельствует о том, что прочность поверхностного слоя, вызванная внедрением дисперсных частиц на первом этапе испытаний нивелирована.

В случае испытаний материалов с более высокой микротвердостью, например ШХ15 при наличии твердых дисперсных частиц магнетита существенный эффект упрочнения не наблюдается (см. рис. 1 б) и интенсивность износа увеличивается. После анализа поверхности

испытуемых материалов установлено, что износ носит преимущественно абразивный характер. Из общих соображений предполагалось, что наночастицы магнитного смазочного масла могут внедряться в микродефекты поверхности трения, тем самым выравнивая ее, вызывая увеличение площади фактического контакта и снижение давление на микровыступах. Однако как показывают данные, приведенные на рис. 1 существенного влияния это не оказывает. Одновременно в ходе проведения эксперимента проводилось измерение силы трения. Установлено, что коэффициент трения немного увеличивается с повышением концентрации магнитных частиц.

На следующем этапе исследований проводилось изучение поверхности стали 20 после трения в магнитном смазочном масле. В состав МСМ входила олеиновая кислота. На них обнаружены различные по форме и размерам микропоры, которые расположены в глубине поверхностного слоя (см. рис. 3). Расстояние от поверхности образца до пор составляло несколько микрометров. Одновременно с этим проводилось трение поверхности стали 20 в масле, отличающемся от первого варианта отсутствием феррочастиц. Установлено, что во втором случае содержание микропор было намного меньше.

Причина образования пор следующая. Как установлено авторами в работе [9] экстремум возникающих при трении напряжений приходится на некотором расстоянии от поверхности образца. Линейные дефекты перемещаются от поверхности в глубь основного материала и локализуются около дефектов, имеющихся в материале, тем самым образуются микрополости.

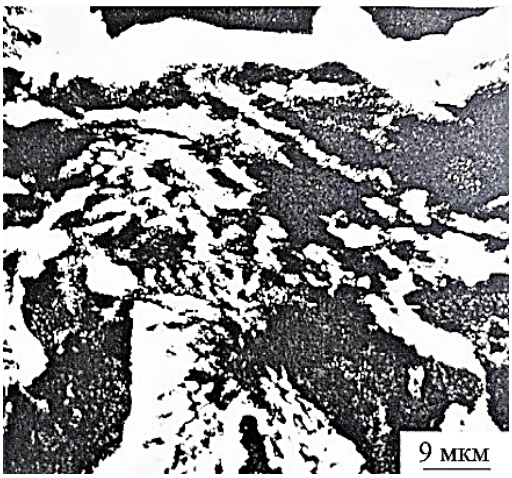


Рис. 3. Электронные микрофотографии косого шлифа после травления поверхности трения.

В магнитном масле всегда находится свободный водород по технологическим причинам и в результате химического взаимодействия ПАВ-стабилизатора с металлической поверхностью. В неоднородных термомагнитных полях, возникающих в поверхностях трения, наблюдается

процесс диффузии водорода в поверхность. Коллекторами водорода служат поры, в которых происходит молизация водорода. Молекулярный водород оказывает силовое воздействие на стенки полости, тем самым провоцируя дополнительное увеличение их линейного размера. Слияние пор приводит к разрушению поверхности (износу) посредством отслаивания микрочастиц (см. рис. 3).

Представляет интерес структура приповерхностной области стальных образцов после трения. Для этого они были подвергнуты кислотному травлению в «царской водке». Как видно из рис. 3 зерна перрита и феррита вытянуты вдоль дорожки трения. Очевидно, что возникающие при трении пластические деформации способствую такому их расположению.

Интересно дополнительно проанализировать поведение ферромагнитных частиц в градиентном магнитном поле, которое обязательно применяется для удержания МСМ в зоне трения. В данном случае наблюдается известное перераспределение частиц в силовом поле в результате чего увеличивается количество частиц у поверхности исследуемого образца. Это оказывает влияние на то, что около поверхности создается повышенное содержание ПАВ в свободном состоянии. В результате скорость образования смазочной пленки на поверхности трения увеличивается, и наблюдается уменьшение силы трения примерно на 10-15%. Однако этот эффект проявляется если относительная скорость скольжения поверхностей невысокая.

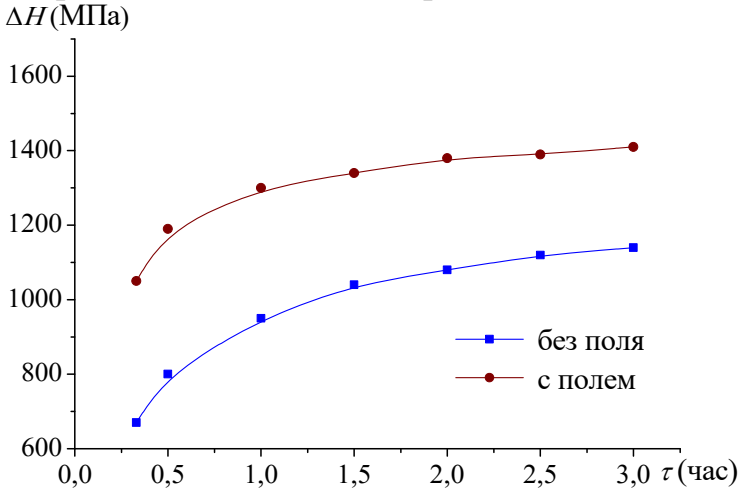


Рис. 4. Изменение микротвердости ΔH поверхности трения из стали У10А после нанесения магнитного масла и выдержки в течение времени τ .

Эффект снижения силы трения в неоднородном магнитном поле можно обосновать следующим образом. Скорость образования смазочной пленки при трении оказывает влияние на проявление эффекта Ребиндера – пластифицирование поверхности трения. Поэтому измерялась скорость пластифицирования поверхности стали У10А в неоднородном поле и без

магнитного поля. Величина пластифицирования оценивалась по изменению микротвердости ΔH тонких поверхностных слоев материалов трения после нанесения МСМ. Данные, приведенные на рис. 4, убедительно подтверждают, что градиентное магнитное поле ускоряет эффект Ребиндера. Таким образом, локально изменяя концентрацию дисперсных частиц магнитным полем, можно целенаправленно регулировать адсорбционные процессы на поверхностях трения.

Противоизносные присадки и наполнители. Результаты проведенных триботехнических испытаний магнитных масел и соответствующих им чистых дисперсионных сред (указаны в скобках), приведены в Таблице 1. Там же представлены установленные физические характеристики МСМ. Как видно из них, значения коэффициента трения, если брать крайние результаты, различаются примерно в 2,5 раза, а интенсивность износа в 10-15 раз. Можно отметить при этом следующее. Если для смазки подшипниковых опор используется традиционное масло, то для повышения антифрикционных характеристик в его состав вводят дополнительные присадки, однако они редко превышают 5% от общего объема. В случае использования МСМ, то их объем достигает 15-20%.

Таблица 1. Триботехнические свойства стабилизированных магнитных масел и соответствующих им дисперсионных сред (в скобках) (f – коэффициент трения, d – диаметр пятна износа на шариковом образце, M_s – намагниченность насыщения МСМ, η – вязкость МСМ).

Марка МСМ	M_s, кА/м	η, Па·с	d, мм	f
МСМ4	30	2,4	1,02 (0,68)	0,28 (0,23)
МСМ5	28	2,2	0,67 (0,68)	0,16 (0,15)
МСМ6	35	1,1	1,61 (0,42)	0,19 (0,15)
МСМ7	22	2,5	1,2 (0,89)	0,32 (0,28)

Для оценки доли присадки МК-01 в свободном состоянии в смазку было введено 15% присадки, после чего феррочастицы были удалены. Химический анализ показал, что в оставшемся масле присадка МК-01 занимает около 5%, по-видимому, она участвует в образовании адсорбционных слоев на феррочастицах.

Таблица 2. Смазочные свойства масла МСМ7 с присадками и наполнителями.

Присадка или наполнитель	f	$J_h \cdot 10^{-9}$
Отсутствует	0,14	14,5
ДФ-11	0,13	4,1
Алфанокс	0,07	3,5
Моливан	0,06	1,1
ИХОС	0,14	3,7
Дисульфид молибдена	0,11	6,7
Графит	0,15	16,5

Введение в состав МСМ твёрдых антифрикционных наполнителей, таких как графит, дисульфид молибдена, не всегда приводит к улучшению смазочных свойств МСМ (см. Таблицу 2). Как следует из работы [10], причина заключается в зависимости эффективности действия твёрдых смазок от состава адсорбированных на их поверхности молекул.

Другие особенности МСМ с присадками связаны со сложным характером взаимодействия различных молекул. Для некоторых МСМ отмечалось быстрое снижение эффективности действия присадок после начала фрикционных испытаний. Заметного изменения вязкости или коллоидной стабильности при этом не происходило. Из большого количества возможных причин данного явления наиболее убедительной представляется следующая. Под влиянием условий трения интенсифицируется процесс десорбции молекул стабилизатора с поверхности частиц. На освободившиеся участки могут адсорбироваться молекулы присадки. Если энергия адсорбции молекул присадки выше или такая же как у стабилизатора, то постепенно произойдёт частичная замена сольватной оболочки. Свободное содержание присадки уменьшается, а стабилизатора возрастает. Поэтому, вероятно, и ухудшаются смазочные свойства МСМ. Качественно такой механизм подтверждается тем, что к аналогичному результату приводит преднамеренное изменение соотношение присадок и стабилизатора.

Зачастую непредсказуемо влияние присадки на структуру и физико-механические свойства масел. После введения присадки масло продолжительное время может сохранять необходимые качества, однако после заправки в узел трения происходят необратимые изменения. Наиболее часто наблюдается изменение реологических свойств в результате того, что в объеме масла развиваются процессы полимеризации и масса молекул увеличивается. Иногда масло приобретает гелеобразные свойства с тиксотропной структурой. Реже происходит отделение дисперсной фазы. Динамика изменений свойств может быть как монотонной, так и лавинообразной после достаточно продолжительного периода нормальной работы. Теоретически предсказать степень изменения свойств МСМ пока не представляется возможным, необходимо длительное время наблюдать за маслом в процессе трения.

Если даже наполнитель влияет на трение положительно, необходимо вводить его только ограниченное количество. При повышении содержания наполнителя вязкость масла возрастает настолько, что оно становится трудноуправляемо магнитным полем. Допустимое содержания наполнителя обычно составляет несколько процентов и зависит от вязкости, магнитных свойств МСМ и конструкции узла трения.

Применение масел с немагнитным наполнителем в реальных узлах

трения может быть затруднено из-за того, что частицы наполнителя выталкиваются из масла магнитным полем в сторону, противоположную от поверхности трения и не попадают на нее. В этом случае положительный результат дает применение наполнителя с частицами, имеющими магнитное ядро. Желательно, чтобы магнитная сила, действующая на частицу, уравновешивалась выталкивающей силой. Тогда частицы будут находиться в безразличном положении равновесия и их концентрация сохранится однородной.

4. Заключение

Показано влияние на трибологические свойства структурных компонентов нанодисперсного магнитного смазочного масла: магнитной фазы, твердосмазочной фазы, противоизносных присадок.

Установлены рекомендуемые значения концентрации нанодисперсной магнитной фазы при эксплуатации в узлах трения из различных по твердости конструкционных материалов. Показано течение двух конкурирующих процессов при трении. Упрочнение контактирующих поверхностей за счет внедрения или адгезионного прилипания нанодисперсных частиц магнетита, что приводит к определенному повышению прочности поверхности и снижению износа. Образующиеся конгломераты из магнитных частиц вызывают преимущественно абразивный износ поверхностей трения.

Выявлен эффект снижения силы трения в неоднородном магнитном поле. Показано, что градиентное магнитное поле ускоряет эффект Ребиндера, происходит пластифицирование поверхности трения. Изменяя концентрацию дисперсных частиц магнитным полем, можно целенаправленно регулировать адсорбционные процессы на поверхностях трения.

Результаты исследования магнитных масел с наполнителями и присадками: графитом, дисульфидом молибдена, Алфанокс и др. выявили неоднозначность влияния присадки на структуру и физико-механические свойства масел в лабораторных и натурных экспериментах. Установлено, что даже в случае положительного влияния твердосмазочного наполнителя на фрикционные свойства магнитного трибоузла, его количество должно быть существенно ограниченно, во избежание чрезмерного увеличения вязкости магнитного масла и потери управляемости магнитным полем. Показана необходимость продолжить исследования в данном направлении.

Библиографический список:

1. **van der Meer, G.H.G.** Experimental comparison of the transition speed of a hydrodynamic journal bearing lubricated with oil and magnetorheological fluid // G.H.G. van der Meer, F. Quinci, W. Litwin et al. // Tribology International. – 2023. – V. 189. – Art. № 108976. – 10 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108976.

2. **Trivedi, K.** Nanolubricant: Magnetic nanoparticle based / K. Trivedi, K. Parekh, R.V. Upadhyay // Materials Research Express. – 2017. – V. 4. – № 11. – Art. № 114003. – 10 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aa95e1.
3. **Zhang, Y.** The roller chain lubricated with ferrofluids / Y. Zhang, Z. Yang, D. Li // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part. J.: Journal of Engineering Tribology. – 2019. – V. 233. – I. 6. – P. 927-935. DOI: 10.1177/1350650118806799.
4. **Болотов, А.Н.** Магнитные силоксановые наножидкости адаптированные для условий граничного трения / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 546-556. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546.
5. **Zhao, J.** Nanolubricant additives: A review / J. Zhao, Y. Huang, Y. He, Y. Shi // Friction. – 2021. – V. 9. – I. 5. – P. 891–917. DOI: 10.1007/s40544-020-0450-8.
6. **Gong, K.** MoS_2 nanoparticles grown on carbon nanomaterials for lubricating oil additives // K. Gong, W. Lou, G. Zhao, X. Wu, X. Wang // Friction. – 2021. – V. 9. – I. 4. – P. 747–757. DOI: 10.1007/s40544-020-0369-0.
7. **Omrani, E.** Effect of micro- and nano-sized carbonous solid lubricants as oil additives in nanofluid on tribological properties / E. Omrani, P.L. Menezes, P.K. Rohatgi // Lubricants. – 2019. – V. 7. – I. 3. – Art. № 25. – 13 p. DOI: 10.3390/lubricants7030025.
8. **Li, J.** Molecular origin of nanofriction contrast between graphite and MoS_2 homojunctions in oil / J. Li, Y. Cheng, W. Song, K. Wang, M. Ma, J. Li // Cell Reports Physical Science. – 2023. – V. 4. – I. 12. – Art. № 101731. – 14 p. DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101731.
9. **Odenbach, S.** Magnetoviscous effects in ferrofluids / S. Odenbach, S. Thurm // In series: Ferrofluids. Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2002. – V. 594. – P. 185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
10. **Chauhan, V.** Magnetorheological fluids: A comprehensive review / V. Chauhan, A. Kumar, R. Sham // Manufacturing Review. – 2024. – V. 11. – Art. № 6. – 15 p. DOI: 10.1051/mfreview/2024005.
11. **Kole, M.** Engineering applications of ferrofluids: A review / M. Kole, S. Khandekar // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. –V. 537. – Art. № 168222. –21 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168222.
12. **Лабкович, О.Н.** Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок / О.Н. Лабкович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – Т. 60. – № 3. С. 265-275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275.
13. **Yang, L.H.** Preparation and tribological property of nano-G/Fe_3O_4 composites / L.H. Yang, X.W. Chen, J.G. Zhang, Y.D. Sun // Journal of Materials Engineering. – 2021. – V. 49. – I. 2. – P. 143–148. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000746.
14. **Sahoo, R.** Design of smart lubricants using the inverse ferrofluid approach // R. Sahoo, P. Ussa-Aldana, D. Lancon, F. Rondelez, J.R. Morillas, R. Hidalgo-Alvarez, J. de Vicente // Tribology International. – 2022. – V. 166. –Art. № 107346. – 12 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107346.
15. **Болотов, А.Н.** Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Часть 3 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2015. – № 8. – С. 66-70.
16. **Болотов, А.Н.** Смазочные свойства магнитных наножидкостей на основе эфиров карбоновых кислот / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555.
17. **Дамдинов Б.Б.** Влияние добавок мелкодисперсных частиц металлов на характеристики смазочных материалов / Б.Б. Дамдинов, Ч.М. Митыпов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2021. – № 1. – С. 28-42. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-28-42
18. **Бреки, А.Д.** Влияние магнитных наночастиц Fe_3O_4 на трение и износ стали 10Х17Н13М2Т в режиме верчения в среде смазочного масла / А.Д. Бреки, И.А. Тюрикова, А.А. Шатульский, А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2018. – №. 4. – С. 103-111.

References:

1. van der Meer G.H.G., Quinci F., Litwin W. et al. Experimental comparison of the transition speed of a hydrodynamic journal bearing lubricated with oil and magnetorheological fluid, *Tribology International,* 2023, vol. 189, art. no. 108976, 10 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108976.
2. Trivedi K., Parekh K., Upadhyay R.V. Nanolubricant: Magnetic nanoparticle based, *Materials Research Express*, 2017, vol. 4, no. 11, art. no. 114003, 10 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aa95e1.
3. Zhang Y., Yang Z., Li D. The roller chain lubricated with ferrofluids, *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, vol. 233, issue 6, pp. 927-935. https://doi.org/10.1177/1350650118806799.
4. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Magnitnye siloksanovye nanozhidkosti adaptirovannye dlya uslovij granichnogo treniya [Silicone magnetic nanofluids adapted for the conditions of boundary friction], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2020, issue 12, pp. 546-556. DOI 10.26456/pcascnn/2020.12.546. (In Russian).
5. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. Nanolubricant additives: A review, *Friction,* 2021, vol. 9, issue 5, pp. 891–917. DOI: 10.1007/s40544-020-0450-8.
6. Gong K., Lou W., Zhao G., Wu X., Wang X. MoS_2 nanoparticles grown on carbon nanomaterials for lubricating oil additives, *Friction,* 2021, vol. 9, issue 4, pp. 747–757. DOI: 10.1007/s40544-020-0369-0.
7. Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Effect of micro- and nano-sized carbonous solid lubricants as oil additives in nanofluid on tribological properties, *Lubricants,* 2019, vol. 7, issue 3, art. no. 25, 13 p. DOI: 10.3390/lubricants7030025.
8. Li J., Cheng Y., Song W., Wang K., Ma M., Li J. Molecular origin of nanofriction contrast between graphite and MoS_2 homojunctions in oil, *Cell Reports Physical Science*, 2023, vol. 4, issue 12, art. no. 101731, 14 p. DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101731.
9. Odenbach S., Thurm S. Magnetoviscous effects in ferrofluids, *Ferrofluids. Lecture Notes in Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, vol. 594, pp. 185-201. DOI: 10.1007/3-540-45646-5_10.
10. Chauhan V., Kumar A., Sham R. Magnetorheological fluids: A comprehensive review, *Manufacturing Review*, 2024, vol. 11, art. no. 6, 15 p. DOI: 10.1051/mfreview/2024005.
11. Kole M., Khandekar S. Engineering applications of ferrofluids: A review, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 537, art. no. № 168222, 21 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168222.
12. Labkovich O.N. Snizheniye poter na treniye pri vikhrevom potoke magnitnoy zhidkosti uglerodnykh nanotrubok [Reduction of friction losses due to the vortex flow of the magnetic fluid caused by the additives of carbon nanotubes], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i organizatsiy stran SNG [ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations],* 2017, vol.60, no. 3, pp. 265–275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275. (In Russian).
13. Yang L.H., Chen X.W., Zhang J.G., Sun Y.D. Preparation and tribological property of nano-G/Fe_3O_4 composites, *Journal of Materials Engineering*, 2021, vol. 49, issue 2, pp. 143–148. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000746.
14. Sahoo R., Ussa-Aldana P., Lancon D., Rondelez F., Morillas J.R., Hidalgo-Alvarez R., de Vicente J. Design of smart lubricants using the inverse ferrofluid approach, *Tribology International*, 2022, vol. 166, art. no. 107346, 12 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107346.
15. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Komplekt oborudovaniya dlya issledovaniya fiziko-khimicheskikh svojstv nanodispersnykh magnitnykh smazochnykh sred. Chast' 3 [A set of equipment for studying the physical and chemical properties of nanodispersed magnetic lubricating media. Part 3], *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya [Mechanics and Physics of Processes on the Surface and in Contact of Solids, Parts of Technological and Power Equipment],* 2015, no. 8, pp. 66-70. (In Russian).
16. Bolotov A.N., Novikova O.O. Smazochnye svojstva magnitnykh nanozhidkostej na osnove efirov karbonovykh kislot [Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2019, issue 11, pp. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555. (In Russian).
17. Damdinov B.B., Mitypov Ch.M. Vliyanie dobavok melkodispersnykh chastits metallov na kharakteristiki smazochnykh materialov [Influence of finely dispersed metal particles additives on lubricants characteristics], *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika [Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics],* 2021, no. 1, pp. 28-42. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-28-42. (In Russian).
18. Breki A.D., Tyurikova I.A., Shatul'skij A.A., Gvozdev A.E., Kutepov S.N. Vliyanie magnitnykh nanochastits Fe_3O_4 na trenie i iznos stali 10H17N13M2T v rezhime vercheniya v srede smazochnogo masla [Effect of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles on friction and wear of 10Kh17N13M2T steel in rotation mode in lubricating oil environment], *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoj akademii im. P.A. Solov'eva [Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov],* 2018, no. 4, pp. 103-111. (In Russian).