Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 621.892

Оригинальная статья

МАГНИТНЫЕ СИЛОКСАНОВЫЕ НАНОЖИДКОСТИ АДАПТИРОВАННЫЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546

Аннотация. Известные в настоящее время магнитные смазочные наножидкости имеют недостаточно хорошие триботехнические характеристики при эксплуатации в режиме граничного трения. Предложен способ адаптации для граничного трения магнитных силоксановых наножидкостей, путем модификации их состава химически активными антифрикционными, противоизносными и противозадирными присадками. Создан ряд смазочных композиций магнитных наножидкости на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5. Приведенные экспериментальные исследования показали, что наиболее значительное улучшение антифрикционных и противоизносных свойств наножидкостей достигается при введении в их структуру хлорсодержащих присадок Совол и ЗН2ТЭ. Добавление в наножидкость антиокислительной присадки ДФ-11, фторсодержащей присадки ЭО-1, металлоплакирующего соединения МКФ-18 не привело к значимому улучшению антифрикционных свойств. Установлено, что магнитные наножидкости с модифицирующими присадками, по трибосвойствам сопоставимы с традиционными немагнитными жидкими смазочными материалами и превосходят пластичные смазки на основе полиэтилсилоксана. Разработанные композиции на основе силоксановых наножидкостей, будут востребованы для смазывания подшипников качения и скольжения, зубчатых передач, контактных уплотнений, которые функционируют при низких и повышенных температурах в газовой среде или в условиях вакуума. Наиболее успешно они могут применяться в вакуумной и космической технике, для магнитных трибоузлов, где возможна только однократная заправка ограниченным объемом смазочного материала.

Ключевые слова: магнитная смазочная наножидкость, граничное трение, изнашивание, смазка, антифрикционные и противоизносные присадки.

1. Введение

Для современных приборов и оборудования, используемых в космической или вакуумной технике, характерно наличие трибосопряжений, работающих продолжительное время при однократной заправке ограниченным объемом смазочного материала [1-3]. В таких системах рационально применять магнитные узлы трения, где в качестве смазочной и смазочно-уплотняющей среды используются магнитные наножидкости (МНЖ), которые по существу являются гибридными наноматериалами [4-9]. Основное преимущество магнитожидкостных трибосопряжений заключается в возможности удержания и регулировки подачи магнитной смазки в контактную зону с помощью стационарного неоднородного магнитного поля. Такие узлы могут автономно работать продолжительное время и характеризуются низкими значениями трения в режиме гидродинамического смазывания. Однако, в режиме граничного

трения магнитные наножи́дкости, имеют недостаточно хорошие триботехнические характеристики [10-14]. Это обусловлено негативными проявлением в процессе трения, дисперсной фазы МНЖ и стабилизатора магнитных наножи́дкостей, вызывающего коррозионный износ поверхностей. Одним из эффективных способов улучшения триботехнических свойств наножи́дкостей является модифицирование их структуры и состава антифрикционными и противоизносными присадками, наполнителями, добавками.

Цель работы заключалась в изучении смазочных свойств магнитных наножи́дкостей на основе полиэтилсилоксана с трибоприсадками при граничном режиме трения и выборе магнитных смазочных композиций для практического использования.

2. Методика исследований

Триботехнические испытания магнитных наножи́дкостей проводились в областях средних и высоких контактных давлений. Высокие контактные давления создавались на машине трения МТШ-М [15]. Реализована схема: три шаровых образца диаметром 8 мм и цилиндрический контробразец, материал пары трения – сталь ШХ-15. Триботехнические характеристики МНЖ при средних давлениях исследованы на машине трения МТП [15] по схеме трения диск (Сталь 3) – палец (бронза ОСЦ5-5-5). Необходимое для испытаний количество магнитной наножи́дкости объемом 1–3 см³ наносилось на диск. Под действием магнитных сил масло удерживается в виде половины тора прямо на дорожке трения.

Реологические свойства магнитных наножи́дкостей оценивались на ротационном вискозиметре в отсутствии магнитного поля. Для оценки коррозионных свойств жидкостей в магнитном поле при циклирующих механических напряжениях использовался оригинальный прибор [5], кривые намагничивания материалов снимались на магнитометре с замкнутой магнитной цепью.

3. Объект исследований

По результатам проведенных трибоиспытаний различных по химическому составу силоксановых жидкостей, для исследований выбраны магнитные наножи́дкости на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 [15, 16]. Полиэтилсилоксан ПЭС-5 хорошо защищает от износа металлические поверхности трения при высоких и средних контактных нагрузках в условиях граничной смазки. Предположительно, за счет формирования на контактирующих поверхностях защитных пленок из кремния и оксидов кремния.

К достоинствам жидкости ПЭС-5 можно отнести ее очень низкую испаряемость, хорошие реологические свойства при низких и высоких температурах и широкую доступность [16]. Магнитные наножидкости на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 имеют очень хорошую седиментационную и агрегативную устойчивость в градиентных магнитных полях. Малая испаряемость входящих в ее состав компонентов позволяет применять жидкости в газовой среде и в условиях вакуума при температуре от -40°C до 100°C . При превышении 100°C в результате деструкции сольватных оболочек в наножидкости формируются коагуляционные процессы. При температуре ниже -40°C , наножидкость теряет магнитоподвижность, то есть прекращается течение ее под действием внешнего магнитного поля.

Испытывались две партии одинаковых по составу магнитных наножидкостей МНЖ1-ПЭС и МНЖ2-ПЭС. Магнитные наножидкости содержали дисперсионную среду на основе кремнийорганической жидкости ПЭС-5 и дисперсные частицы магнетита (около 6 об.%), стабилизированные олеиновой кислотой. Характерный размер частиц магнетита, в составе МНЖ, от 5 до 17 нм, средний ≈ 10 нм. Намагниченность насыщения частиц ≈ 430 кА/м, а их поверхность обладала хорошей адсорбционной способностью, для сохранения коллоидной стабилизации. МНЖ1-ПЭС характеризовалась пластической вязкостью около 2,0 Па·с, и намагниченностью насыщения – 21 кА/м, а МНЖ2-ПЭС соответственно 2,1 Па·с и 26 кА/м. Некоторые различия в физико-химических свойствах наножидкостей связаны с технологическими особенностями их получения и увеличенным содержанием олеиновой кислоты в наножидкости МНЖ2-ПЭС.

При составлении смазочных композиций на основе магнитных наножидкостей необходимым условием является, во-первых, сохранение агрегативной и седиментационной устойчивости магнитного коллоида; во-вторых, хорошая растворимость присадки в жидкости-носителе. Для достижения хороших смазочных свойств магнитных наножидкостей в режиме граничного трения, в их состав были введены антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки: ДФ-11, Совол, ЭО-1 и 3Н2ТЭ. Антиокислительная, антикоррозионная и противоизносная присадка ДФ-11 – это 50 %-ный раствор диалкилдитиофосфата цинка в масле. Противоизносная и противозадирная присадка Совол, – представляет собой смесь пента- и тетра-хлордифенилов, и содержит 40 % хлора. Противоизносная и противозадирная присадка-стабилизатор 3Н2ТЭ содержит хлорированный эфир пентадиена. ЭО-1 – фторсодержащая присадка образует прочные, устойчивые к износу слои на поверхностях трения. Так же в жидкости добавляли металлоплакирующее соединение на

основе олеата меди – МКФ-18 и антифрикционные ПАВ – олеиновую (ОК) и стеариновую (СК) кислоты. Вводимые компоненты диспергировались в магнитной наножидкости при интенсивном перемешивании в течение 30 мин при 40–50 °С. Установлены концентрации компонентов, не ухудшающих коллоидные свойства наножидкости: ЭО-1, ДФ-11 – не более 5 %; Совол, 3Н2ТЭ – не более 20 %; МКФ-18, ОК, СК – не более 2 %.

4. Результаты испытаний смазочных свойств магнитных наножидкостей

По результатам испытаний триботехнических свойств наножидкостей установлено, что свойства МНЖ1-ПЭС почти аналогичны свойствам кремнийорганической жидкости ПЭС-5, на основе которой она изготовлена, а свойства МНЖ2-ПЭС существенно хуже (см. Таблицу 1). Наножидкости МНЖ1-ПЭС и МНЖ2-ПЭС отличаются по трибосвойствам потому, что в результате некоторых особенностей проведенной пептизации, жидкость МНЖ2-ПЭС содержит олеиновую кислоту в свободном состоянии и небольшое количество агрегатов из магнитных частиц. Видно, что небольшие отклонения в технологии получения магнитной наножидкости приводят к существенному ухудшению смазочных характеристик. Магнитные агрегаты способствуют абразивному разрушению поверхности трения, а олеиновая кислота активирует этот процесс. Такой механизм влияния на трение растворенных в наножидкости жирных кислот подтверждают данные по свойствам исследуемых сред с добавками олеиновой и стеариновой кислот. Для улучшения свойств наножидкостей аналогичных по составу МНЖ2-ПЭС целесообразно применять технологию магнитной сепарационной очистки наножидкости от агломератов, а также технологию замены дисперсионной среды методом обратимой флокуляции дисперсной фазы [17].

Исследование влияния концентрации присадок на фрикционные характеристики жидкости МНЖ2-ПЭС (рис. 1 а, б) показали необходимость введения значительно большего содержания присадки в МНЖ (10–15 % об.), чем в традиционные немагнитные смазки (1–5 %), что обусловлено по-видимому адсорбцией значительного ее количества на поверхности магнетита и поэтому малым содержанием в дисперсионной среде.

В отдельных случаях, например, для жидкости МНЖ-ПЭС наблюдалась экстремальная зависимость смазочных свойств от содержания присадки. При небольших концентрациях присадки происходило ухудшение смазочных свойств масла (см. Таблицу 1, МНЖ1-ПЭС+Совол), а затем по мере роста содержания присадки свойства

улучшались, как показано на рис. Это проявление отрицательного синергетического эффекта совместного действия ПАВ-стабилизатора и ПАВ-присадки. Можно предположить, что механизм этого явления связан с сорбционными процессами всех ПАВ присутствующих в масле. Вероятно, в наножижкостях после введения присадки постепенно происходит частичное вытеснение молекул ПАВ-стабилизатора, адсорбированного на магнитных частицах, более полярными молекулами присадки. В наножижкости МНЖ-ПЭС по этой причине освобождается олеиновая кислота, которая негативно влияет на трение. Когда содержание присадки в жидкости свыше 6÷7 масс.%, трение и износ начинают снижаться из-за доминирования на контактирующих поверхностях адсорбированных молекул присадки.

Таблица 1. Фрикционные свойства магнитных смазочных композиций на основе МНЖ-ПЭС при граничном режиме трения (v – скорость скольжения, P – давление в зоне контакта, f – коэффициент трения, I_h – интенсивность линейного износа, d – диаметр пятна износа).

Смазочная композиция	Машина трения МТП $v = 0,32$ м/с, $P = 4,2$ МПа		Машина трения МТШ-М $v = 0,24$ м/с, $P = 1,25$ ГПа	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	d , мм
1. ПЭС-5	0,14	14,5	0,21	0,69
2. МНЖ1-ПЭС	0,12	12,6	0,15	0,6
3. МНЖ2-ПЭС	0,14	21,6	0,32	1,2
4. МНЖ1-ПЭС +1%ОК	-	-	0,29	1,15
5. МНЖ2-ПЭС +1%СК	-	-	0,37	1,28
6. МНЖ1- ПЭС +5масс.% Совол +15масс.% Совол +20масс.% Совол	0,08	2,1	0,15 0,13 0,12	0,82 0,48 0,39
7. МНЖ2-ПЭС + 15масс.% Совол	0,07	2,8	0,14	0,48
8. МНЖ1-ПЭС + 10масс.% ДФ-11	0,13	4,1	0,12	0,69
9. МНЖ1-ПЭС + 5масс.% 3Н2ТЭ	0,14	3,7	0,16	0,49
10. МНЖ1-ПЭС+I% МКФ-18	-	-	0,23	0,89
11. МНЖ1-ПЭС+5% ЭО-1	-	-	0,15	0,59
10. ТМ-5-18	0,07	0,4	0,15	0,35
11. ОКБ-122-7(1)	–	–	0,13÷0,34	0,71
12. ОКБ-122-7(2)	0,12	≈15	0,13	0,62
13. МНЖ-И20	0,14	4,1	0,16	0,58
14. МНЖ-ВМ4	0,16	15,4	0,22	0,72

Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (а) МНЖ2-ПЭС и диаметра пятна износа (б) от концентрации присадки (машина трения МТШ-М).

Установлено что наиболее заметный триботехнический эффект был достигнут при введении в магнитную смазочную композицию противозадирных хлорсодержащих присадок. Смазочные свойства магнитной наножидкости МНЖ1-ПЭС, имеющей в составе 15 масс.% присадки Совол сравнимы с характеристиками трансмиссионного масла ТМ-5-18 (см. данные Таблицы 1). При дальнейшем увеличении концентрации присадки, одновременно со снижением трения происходит разрушение коллоидной структуры наножидкости и возрастает коррозионное действие хлора в составе присадки.

Проведенные исследования показали, что растворение в жидкости МНЖ2-ПЭС присадки Совол позволяет поднять ее свойства до уровня наножидкости МНЖ1-ПЭС (см. данные Таблицы 1) без предварительной трудоемкой обработки. Этот эффект объясняется тем, что молекулы присадки Совол, обладающие большим дипольным моментом, диспергируют абразивные агломераты магнитных частиц и вытесняют с поверхности трения молекулы олеиновой кислоты, стимулирующие ее разрушение.

Присадка 3H2TЭ, уже при содержании около 5 масс.%, позволяет значительно улучшить противоизносные свойства магнитной наножидкости МНЖ-ПЭС. Присадка сглаживает процесс трения, практически не влияет на коллоидную устойчивость магнитной композиции.

Добавление в наножидкость МНЖ-ПЭС присадок ДФ-11, ЭО-1, МКФ-18 не привело к значимому улучшению антифрикционных свойств.

По результатам триботехнических испытаний магнитных наножидкостей на основе ПЭС-5 установлено, что смазочная композиция

МНЖ1-ПЭС с присадками Совол и 3Н2ТЭ наиболее перспективна для практического применения в трибоузлах эксплуатируемых в условиях граничного трения при однократном заполнении смазочным материалом.

Для сравнения изучены смазочные свойства магнитных жидкостей МНЖ-И20 (основа – индустриальное масло И-20) и МНЖ-ВМ4 (основа – вакуумное масло ВМ-4), которые долгое время пытались использовать для смазывания различных трибосопряжений (см. данные Таблицы 1). Видно, что по смазочным свойствам они уступают предложенным нами магнитным маслам и имеют недопустимо высокую испаряемость.

Если не учитывать магнитные особенности смазочной наножидкости МНЖ1-ПЭС, то по своим реологическим, низкотемпературным и коллоидным свойствам, по испаряемости и невосприимчивости к окружающей среде, она очень близко соответствует пластичным смазочным материалам с дисперсионной средой из полиэтилсилоксана. Среди пластичных смазок содержащих полиэтилсилоксан одной из лучших по трибосвойствам признана смазка ОКБ-122-7. Триботехнические свойства смазки, определенные по методике испытаний магнитных наножидкостей, приведены в Таблице 1. Смазку ОКБ-122-7(1) однократно помещали в узел трения, потери смазки ОКБ-122-7(2) в процессе трения постоянном восполняли. В обоих случаях смазочные свойства магнитной наножидкости МНЖ1-ПЭС выше, следовательно, магнитные смазочные наножидкости можно эффективно использовать в тех же трибоузлах, в которых в данное время применяются пластичные смазочные материалы содержащие полиэтилсилоксан.

Все смазочные материалы характеризуются ресурсом работы, который определяется временным интервалом, в течение которого масло способно в процессе эксплуатации сохранять на допустимом уровне свои смазочные и физико-химические свойства. Для сравнительной оценки ресурса традиционного немагнитного смазочного материала и магнитной смазочной наножидкости проводили длительные испытания узла трения, заправленного ограниченным объемом масла. Ресурс магнитной наножидкости оказался приблизительно на 10% меньше, чем, например, трансмиссионного масла ТМ-5-18 и на два-три порядка больше, чем пластичной смазки ОКБ-122-7. Магнитная наножидкость переставала выполнять свое назначение только после прекращения процесса поступления ее в зону трения под действием магнитных сил из-за недопустимого повышения вязкости и снижения намагниченности.

Магнитная наножидкость МНЖ1-ПЭС или аналогичная содержащая специальные присадки, может быть применена для смазывания подшипников качения и скольжения, зубчатых передач, контактных уплотнений и других узлов, которые функционируют при низких и

повышенных температурах в газовой среде или в условиях вакуума.

Магнитная наножидкость МНЖ1-ПЭС с присадками была успешно апробирована, например, для смазки шпиндельных узлов опытного оборудования, предназначенного для распиловки, обдирки и огранки природных алмазов.

Следует особо отметить, что широкое варьирование смазочных свойств магнитной наножидкости МНЖ1-ПЭС с помощью присадок не позволило устранить низкую структурную стабильность МНЖ-ПЭС в режиме граничной смазки при температуре более 100°C, что связано как с процессом окисления ПАВ-стабилизатора, так и с разрывом хемосорбционной связи олеиновая кислота – магнетит, десорбцией стабилизатора и образованием агрегатов частиц.

5. Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность значительного улучшения антифрикционных и противоизносных свойств магнитных наножидкостей на основе полиэтилсилоксана путем введения в их структуру специальных химически активных присадок. Установлено что, при эксплуатации магнитожидкостного узла в режиме граничного трения хлорсодержащие присадки Совол и 3Н2ТЭ дают наибольший триботехнический эффект, даже при однократном заполнении смазочным материалом.

Показано, что магнитные наножидкости с присадками, по трибосвойствам сопоставимы с традиционными немагнитными жидкими смазочными материалами. Смазочные свойства модифицированных магнитных силоксановых наножидкостей превосходят пластичные смазки на основе полиэтилсилоксана. Уникальные магнитные свойства разработанных смазочных наножидкостей, обеспечивающие надежное удержание в зоне трения, дают им преимущество перед немагнитными смазками. Полученные материалы могут эффективно применяться как в традиционных, так и трибоузлах, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Вместе с тем, следует учитывать, что в результате сложности структуры магнитных наножидкостей, модификация их присадочными материалами имеет ряд важных особенностей, которые связаны с коллоидной стабильностью, реологией и другими свойствами конечного продукта.

Библиографический список:

1. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // Lecture Notes in Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p. DOI: 10.1007/3-540-45646-5.

2. **Ермаков, С.Ф.** Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением / С.Ф. Ермаков // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. – № 3. – С. 275-283.
3. **Сутягин, О.В.** Контакт шероховатых тел с твердосмазочными покрытиями: монография / О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, М.В. Васильев. – Тверь: Твер. гос. техн. ун-т, 2014. – 124 с.
4. **Берковский, Б.М.** Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
5. **Болотов, А.Н.** Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – Тверь: Твер. гос. техн. ун-т, 2013. – 123 с.
6. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.
7. **Sarkar, C.** Synthesis and characterization of antifriction magnetorheological fluids for brake / C. Sarkar, H. Hirani // Defence Science Journal. – 2013. – V. 63. – №. 4. – P. 408-412. DOI: 10.14429/dsj.63.2633.
8. **Urreta, H.** Seals based on magnetic fluids for high precision spindles of machine tools / H. Urreta, G. Aguirre, P. Kuzhir, L.N. Lopez de Lacalle // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2018. – V. 19. – I. 4. – P. 495-503. DOI: 10.1007/s12541-018-0060-9.
9. **Wang, L.J.** Experimental research on tribological properties of $Mn_{0.78}Zn_{0.22}Fe_2O_4$ magnetic fluids. / L.J. Wang, C.W. Guo, R. Yamane // Journal of Tribology. – 2008. – V. 130. – I. 3. – P. 031801-1-031801-5. DOI:10.1115/1.2913539.
10. **Bombard, A.J.F.** Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts / A.J.F. Bombard, F.R. Gonçalves, K. Shahrivar, A.L. Ortiz, J. De Vicente // Tribology International. – 2015. – V. 81. – P. 309-320. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.09.013.
11. **Болотов, А.Н.** Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2009. – Вып. 1. – С. 5-9.
12. **Shahrivar, K.** A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel-steel point contacts / K. Shahrivar, A. L. Ortiz, J. De Vicente // Tribology International. – 2014. – V. 78. – P. 125-133. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.008.
13. **Rosa, W.O.** Tribological behavior of glycerol/water-based magnetorheological fluids in PMMA point contacts / W.O. Rosa, F. Vereda, J. Vicente // Frontiers in Materials. – 2019. – V. 6. – P. 1-11. DOI: 10.3389/fmats.2019.00032.
14. **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.
15. **Bolotov, A.N.** Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Journal of Friction and Wear. – 2017. – V. 38. – № 2. – P. 121-125. DOI: 10.3103/S1068366617020040.
16. **Скороходов, И.И.** Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / И.И. Скороходов, К.П. Гриневич, Т.В. Королева, М.В. Соболевский; под общ. ред. М.В. Соболевского. – М.: Химия, 1985. – 264 с.

17. **Бибик, Е.Е.** Достижения в области получения и применения ферромагнитных жидкостей / Е.Е. Бибик, О.В. Бузунов. – М.: Электроника, 1979. – 59 с.

References:

1. **Odenbach, S.** Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications / S. Odenbach // *Lecture Notes in Physics*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 256 p. DOI: 10.1007/3-540-45646-5.
2. **Ermakov, S.F.** Effect of lubricants and additives on the tribological performance of solids. Part 2. Active friction control / S.F. Ermakov // *Journal of Friction and Wear*. – 2012. – V. 33. – № 3. – P. 217-223. DOI: 10.3103/S106836661203004X.
3. **Sutyagin, O.V.** Kontakt sherokhovatykh tel s tverdosmazochnymi pokrytiyami: monografiya [Contact of rough bodies with solid lubricant coatings: monograph] / O.V. Sutyagin, A.N. Bolotov, M.V. Vasil'ev. – Tver: TSTU, 2014. – 124 p. (In Russian).
4. **Berkovskii, B.M.** Magnetic fluids / B.M. Berkovskii, V.F. Medvedev, M.S. Krakov. – Oxford : Oxford University Press, 1993. – xii, 243 p.
5. **Bolotov, A.N.** Raschet i optimizatsiya postoyannykh magnitov dlya spetsial'nykh podshipnikovyykh opor: monografiya [Calculation and optimization of permanent magnets for special bearings: monograph] / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova. – Tver: TSTU, 2013. – 123 p. (In Russian).
6. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – V. 252. – P. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.
7. **Sarkar, C.** Synthesis and characterization of antifriction magnetorheological fluids for brake / C. Sarkar, H. Hirani // *Defence Science Journal*. – 2013. – V. 63. – №. 4. – P. 408-412. DOI: 10.14429/dsj.63.2633.
8. **Urreta, H.** Seals based on magnetic fluids for high precision spindles of machine tools / H. Urreta, G. Aguirre, P. Kuzhir, L.N. Lopez de Lacalle // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2018. – V. 19. – I. 4. – P. 495-503. DOI: 10.1007/s12541-018-0060-9.
9. **Wang, L.J.** Experimental research on tribological properties of $Mn_{0.78}Zn_{0.22}Fe_2O_4$ magnetic fluids. / L.J. Wang, C.W. Guo, R. Yamane // *Journal of Tribology*. – 2008. – V. 130. – I. 3. – P. 031801-1-031801-5. DOI:10.1115/1.2913539.
10. **Bombard, A.J.F.** Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts / A.J.F. Bombard, F.R. Gonçalves, K. Shahrivar, A.L. Ortiz, J. De Vicente // *Tribology International*. – 2015. – V. 81. – P. 309-320. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.09.013.
11. **Bolotov, A.N.** Magnitnye masla tribotekhnicheskogo naznacheniya [Tribotechnical magnetic oils] / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2009. – I. 1. – P. 5-9. (In Russian).
12. **Shahrivar, K.** A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel-steel point contacts / K. Shahrivar, A. L. Ortiz, J. De Vicente // *Tribology International*. – 2014. – V. 78. – P. 125-133. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.008.
13. **Rosa, W.O.** Tribological behavior of glycerol/water-based magnetorheological fluids in PMMA point contacts / W.O. Rosa, F. Vereda, J. Vicente // *Frontiers in Materials*. – 2019. – V. 6. – P. 1-11. DOI: 10.3389/fmats.2019.00032.
14. **Bolotov, A.N.** Smazochnye svoistva magnitnykh nanozhidkostei na osnove ehfirov

karbonovykh kislot [Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids] / A.N. Bolotov, O.O. Novikova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2019. – I. 11. – P. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555. (In Russian).

15. **Bolotov, A.N.** Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Journal of Friction and Wear. – 2017. – V. 38. – № 2. – P. 121-125. DOI: 10.3103/S1068366617020040.

16. **Skorokhodov, I.I.** Oligoorganosiloksany. Svoistva, polucheniye, primeneniye [Oligoorganosiloxanes. Properties, synthesis and application] / I.I. Skorokhodov, K.P. Grinevich, T.V. Koroleva, M.V. Sobolevskij; Ed. by I.I. Skorokhodov. – M.: Khimiya, 1985. – 264 p. (In Russian).

17. **Bibik, E.E.** Dostizheniya v oblasti polucheniya i primeneniya ferromagnitnykh zhidkostei [Advances in the production and application of ferromagnetic fluids] / E.E. Bibik, O.V. Buzunov. – M.: Elektronika, 1979. – 59 p. (In Russian).

Original paper

SILICONE MAGNETIC NANOFLUIDS ADAPTED FOR THE CONDITIONS OF BOUNDARY FRICTION

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546

Abstract: Currently known magnetic lubricant nanofluids have insufficiently good tribological characteristics when operating in the boundary friction mode. An adaptation method is proposed for the boundary friction of magnetic siloxane nanofluids by modifying their composition with chemically active antifriction, antiwear and extreme pressure additives. A number of lubricating compositions of magnetic nanofluids based on polyethylsiloxane PES-5 have been created. Conducted experimental studies have shown that the most significant improvement in the antifriction and antiwear properties of nanofluids is achieved with the introduction of Sovol and 3N2TE chlorine additives into their structure. Adding to the nanofluid the antioxidant additive DF-11, the fluorine-containing additive EO-1, the metal-plating compound MKF-18 did not lead to a significant improvement in the antifriction properties. It has been established that magnetic nanofluids with modifying additives are comparable in tribological properties with traditional non-magnetic liquid lubricants and are superior to plastic lubricants based on polyethylsiloxane. The developed compositions based on siloxane nanofluids will be in demand for lubrication of rolling and sliding bearings, gears, contact seals, which operate at low and elevated temperatures in a gas environment or in a vacuum. Most successfully, they can be used in vacuum and space technology, for magnetic frictional units, where only one refueling with a limited amount of lubricant is possible.

Keywords: *magnetic lubricant nanofluid, boundary friction, wear, lubrication, anti-friction and anti-wear additives.*

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой 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»

Новиков Владислав Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Docent, Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Vladislav V. Novikov – Ph. D., Docent, Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 5.04.2020; после рецензирования/revised: 6.05.2020; принята/accepted 20.05.2020.