

СМАЗОЧНЫЕ НАНОМАСЛА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук,

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2020

Описаны технологические особенности синтеза смазочного наномасла на основе полиэтилсилоксана, исследованы его смазочные свойства при различных условиях трения. Приведены рекомендации по выбору компонентов для создания магнитного смазочного наномасла, которые характеризуются различными механизмами снижения трения и износа трущихся поверхностей. Показаны специфические особенности процессов трения поверхностей, смазанных магнитным наномаслом.

Ключевые слова: магнитное смазочное наномасло, трение, изнашивание, дисперсионная среда, магнитная дисперсная фаза, антифрикционные и противоизносные присадки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-13-21

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых машин и механизмов для современной промышленности невозможно без использования триботехнических узлов, способных эффективно работать в жестких условиях эксплуатации. Основным элементом практически всех трибоузлов являются традиционные смазочные материалы, в создании которых, несомненно, достигнут определенный прогресс. Однако зачастую даже применение этих материалов не позволяет достичь требуемых технических показателей. В ряде случаев сложные триботехнические задачи удается решить за счет использования принципиально новых материалов – магнитных смазочных наномасел, отличительной особенностью которых является аномально высокая намагниченность [1–4]. Преимущество таких масел перед традиционными заключается в том, что их можно подавать в зону трения и удерживать там с помощью стационарных неоднородных термомагнитных полей. Таким образом, для смазки трибоузлов не требуются специальные циркуляционные насосы, абсолютная герметичность, большой объем масла и др. Примеры реализации подшипниковых узлов со смазкой магнитным маслом приведены в [3].

Для смазывания трибосопряжений, работающих постоянно или кратковременно при граничном режиме трения, необходимо создавать специальные магнитные жидкости – магнитные смазочные наномасла (МН) [5–7]. Причем антифрикционные и противоизносные свойства наномасел должны быть на уровне свойств лучших традиционных смазочных немагнитных масел для аналогичных условий трения [8].

Таким образом, очевидно, что для триботехнических целей нужно использовать не обычные неадаптированные для трения магнитные жидкости, а специально созданные на основе системного подхода магнитные наномасла с высокими смазочными свойствами и специфическими физико-химическими характеристиками (вязкостью, испаряемостью, температурой застывания и кипения и т.д.).

Основная задача данного исследования состояла в разработке технологических основ синтеза магнитных смазочных наномасел на основе силиконов, сочетающих высокие магнитные и триботехнические характеристики. При описании характеристик разрабатываемых магнитных масел особое внимание уделялось смазочным свойствам при граничном трении, поскольку именно этот режим в основном лимитирует долговечность узлов трения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К основе магнитных смазочных наномасел (содержание которой может превышать 70...80 %) предъявляют следующие основные требования:

- невысокая скорость испарения;
- достаточно низкая вязкость и температура застывания;
- хорошие триботехнические свойства в режиме граничной смазки;
- низкая склонность к окислению при каталитическом действии магнетита;
- оптимальные магнитные и реологические свойства;
- невысокая себестоимость производства.

В работе [5] показано, что смазочные свойства магнитных наномасел сильно зависят от их основы, поэтому выбирать ее следует особенно тщательно.

Испытания магнитного масла проводились на установках, функционирующих по схемам трения *шар – плоскость* (аббревиатура установки МТШ-М) при контактном давлении 1,25 ГПа и *торец цилиндра – плоскость* (аббревиатура установки МТП) при контактном давлении 4,2 МПа. Скорость скольжения 0,5 и 0,24 м/с соответственно. Материалы трущихся поверхностей: шаровой образец – сталь ШХ15, контртело – сталь 20Х, цилиндрический образец – сталь Ст3, контртело – бронза марки БрОСЦ5-5-5.

Для исследований были выбраны магнитные наножидкости на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 [1]. В табл. 1 приведены результаты трибоиспытаний дисперсионных сред магнитных наножидкостей, представляющих основные группы кремнийорганических жидкостей. Видно, что полиэтилсилоксан ПЭС-5 хорошо защищает от износа металлические поверхности трения при высоких контактных нагрузках в условиях граничной смазки и, кроме того, обладает крайне низкой летучестью, имеет хорошую текучесть при низких температурах.

Таблица 1. Смазочные свойства дисперсионных сред магнитных масел

Марка жидкости	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПМС-100р	–	–	0,25	0,89
ПЭС-5	0,12	9	0,21	0,47
ФМ-6	0,15	5,9	0,30	1,20
ПМТС-5	0,18	25	0,22	0,60
ФС-56	–	–	0,13	0,42

Примечание. f – коэффициент трения; I_h – интенсивность линейного износа; d – диаметр пятна износа.

Для улучшения смазочных свойств магнитных наномасел в их состав вводились специальные антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки, содержание которых варьировалось от 1 до 20 масс.%. При составлении смазочных

композиций на основе магнитных наномасел необходимыми условиями являются, во-первых, сохранение агрегативной и седиментационной устойчивости магнитного коллоида и, во-вторых, хорошая растворимость присадки в жидкости-носителе, так как магнитная эмульсия быстро расслаивается в магнитном поле.

Изучалось влияние на трение магнитных смазочных композиций следующих противозадирных и противоизносных присадок: ДФ-11, совол и ЗН2ТЭ. Присадка ДФ-11 представляет собой 50%-й раствор диалкилдитиофосфата цинка в масле; получена на основе изобутилового спирта и 2-этилгексанола; улучшает антиокислительные, антикоррозионные и противоизносные свойства смазочных масел. Совол – это смесь пента- и тетрахлордифенилов, содержащая 40 % хлора; применяется в качестве противоизносной и противозадирной присадки. Присадка-стабилизатор ЗН2ТЭ, содержащая хлорированный эфир пентадиена, улучшает противоизносные и противозадирные свойства масел. В состав жидкости вводили также антифрикционное поверхностно-активное вещество – олеиновую кислоту (ОК). Компоненты диспергировались в магнитной наножидкости при интенсивном перемешивании в течение 30 мин при 40...50 °С. Концентрации компонентов, не ухудшающих коллоидные свойства масла: ДФ-11 – не более 5 %; совол, ИХОС ЗН2ТЭ – не более 20 %; ОК – не более 2 %.

Присадка-стабилизатор ЗН2ТЭ наиболее эффективно улучшает смазочные свойства дисперсионных сред за счет образования на поверхности трения защитных пленок, содержащих хлориды металлов. Присадка совол хорошо снижает трение и износ при невысоких контактных давлениях независимо от состава силоксановой дисперсионной среды. Присадка ДФ-11 умеренно снижает трение и износ основы наножидкостей во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА НАНОМАСЕЛ

Для получения магнитных наномасел использовался высокодисперсный магнетит, полученный по методу Элмора [2]. Размер частиц магнетита изменялся от 5 до 17 нм при их среднем размере приблизительно 10 нм; намагниченность насыщения частиц около 430 кА/м; микротвердость наночастиц магнетита около 5 ГПа (это следует учитывать при выборе материалов поверхностей трения).

В некоторых магнитных маслах на основе полиэтилсилоксана применялись дисперсные частицы из карбонильного железа, полученные термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ в жидкости-носителе с различным содержанием ПАВ. Средний размер железных магнитных частиц составлял около 5 нм; характерная намагниченность насыщения полученных масел 20...40 кА/м; микротвердость частиц карбонильного железа примерно на порядок меньше, чем у магнетита.

Для стабилизации коллоидных частиц применяют поверхностно-активные вещества, которые адсорбируются на поверхности магнетита и предотвращают агломерацию магнитных частиц, а также обеспечивают седиментационную стабильность коллоида в гравитационных и магнитных полях. Накопленный опыт изучения магнитных наномасел показывает, что для этих целей целесообразно использовать ОК.

Для пептизации магнитных наномасел на основе ПЭС-5 с магнитными наночастицами карбонильного железа хорошо подошел хлорфенилсилоксан ХС-2-1ВВ. Химическая адсорбция молекул жидкости ХС-2-1ВВ происходила непосредственно во время синтеза магнитных частиц при температуре 200 °С на их каталитически активной поверхности. Стабилизатор ХС-2-1ВВ, растворенный в несущей среде ПЭС-5, благоприятно влияет на трибосвойства смазочной композиции (табл. 2): процесс трения

становится более плавным, коэффициент трения и износ снижаются во всем диапазоне нагрузок.

Таблица 2. Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с ПАВ-стабилизаторами

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,12	9,0	0,21	0,69
ПЭС-5 + 5 % (масс.) ОК	0,13	20,0	0,32	0,89
ПЭС-5 + 1 % (масс.) ХС-2-1ВВ	0,10	4,5	0,13	0,42
ПЭС-5 + 1 % (масс.) МКС-2-0	–	–	0,15	0,53

Примечание. f – коэффициент трения; I_h – интенсивность линейного износа; d – диаметр пятна износа.

Разработаны магнитные смазочные наномасла на основе полиэтилсилоксана, в которых, с целью повышения температурной стабильности и улучшения реологических свойств при низких температурах, для пептизации использовали кремнийорганические триметилсилиллированные этилсиликаты (олигомер марки МКС-2-0). МКС-2-0, имеющий хорошую совместимость с дисперсионной средой магнитных наномасел и прочно адсорбируемый посредством поверхностно-активных этоксильных групп, защищает магнетит от агломерации. Данный олигомер не способствует химической модификации поверхности трения и поэтому не может влиять на снижение износа при высоких контактных давлениях (см. табл. 2). Олигомер МКС-2-0 незначительно снижает силу трения.

Для всех синтезированных магнитных масел агрегативная устойчивость нарушается, если значение градиента магнитного поля выше критического: $\text{grad } H \geq 5 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$. Если поле в узле трения меньше критического, образование агломератов из магнитных частиц затруднено и абразивная составляющая изнашивания поверхностей трения становится незначительной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Магнитное поле, присутствующее в магнитожидкостных трибоузлах, оказывает разнообразное влияние на различные по природе процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта [8]. Магнитное поле влияет на коллоидную структуру наномасла, динамику формирования смазочного слоя на поверхностях трения и на их механические свойства. Наиболее важная функция магнитного поля заключается в организации движения магнитного наномасла через зону трения для обеспечения регенерации смазочной пленки. Например, если отключить магнитное поле после начала испытаний наномасла на машине трения МТШ, то при смазывании МН1-ПЭС + 5 % (масс.) совол средний коэффициент трения постепенно возрастает от 0,23 до 0,27 и движение становится неравномерным из-за недостатка наномасла для восстановления сплошной смазочной пленки. Несмотря на наличие большого объема резервного наномасла, его поступление в зону трения под действием поверхностных сил и сил тяжести происходит недостаточно быстро из-за сравнительно высокой вязкости наномасла. После наложения магнитного поля на наномасло начинают

действовать магнитные силы, которые легко преодолевают силы внутреннего трения и обеспечивают регенерацию пленки смазки.

Специально изучалась коррозионная активность рассматриваемых магнитных наномасел. Исследования проводились на медных образцах, выполненных в виде проволочек небольшого диаметра. Для приближения условий модельных коррозионных испытаний к натурным условиям, которые возникают при трении, проволочка подвергалась циклическому нагреву и упругому деформированию. Неожиданно оказалось, что скорость коррозии меди в качественных магнитных наномаслах на порядок меньше, чем в соответствующих дисперсионных средах, содержащих ПАВ-стабилизатор. Коррозионная активность магнитных наномасел начинала повышаться только после введения в их состав дополнительно около 10 % (масс.) стабилизатора. Причина, по которой магнитные наномасла без присадок слабо корродируют поверхности металлов, заключается в том, что сильно развитая поверхность дисперсных частиц аккумулирует на себе основную массу молекул стабилизатора в адсорбированном состоянии.

Магнитное смазочное наномасло МН1-ПЭС (табл. 3) пептезировано ОК и включает всего 5...6 % (об.) магнитных дисперсных ноночастиц. Однако вязкость наномасла значительно превосходит вязкость дисперсионной среды, и это не укладывается в реологические модели дисперсных сред. Возможно, адсорбированные на частицах молекулы образуют оболочку, состоящую из нескольких последовательно располагающихся слоев молекул. Происходящее в результате этого увеличение гидродинамического размера частиц приводит к росту вязкости. Намагниченность технического насыщения наномасла МН1-ПЭС не слишком высокая – 18...24 кА/м, однако для магнитного перемещения наномасла в трибузле этого достаточно.

Таблица 3. Свойства магнитных наномасел на основе ПЭС-5

Смазочная композиция	Машина трения МТП		Машина трения МТШ-М	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,14	14,5	0,21	0,69
МН1-ПЭС ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{ОК}$)	0,12	12,6	0,15	0,6
МН1-ПЭС + 5 % (масс.) совол	–	–	0,15	0,82
МН1-ПЭС + 15 % (масс.) совол	0,08	2,1	0,13	0,48
МН1-ПЭС + 20 % (масс.) совол	–	–	0,12	0,39
МН1-ПЭС + 10 % (масс.) ДФ-11	0,13	4,1	0,12	0,69
МН1-ПЭС + 5 % (масс.) ЗН2ТЭ	0,14	3,7	0,16	0,49
МН2-ПЭС ($\text{Fe} + \text{ХС-2-1ВВ}$)	0,1	2,0	0,3	0,95
МН3-ПЭС ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{МКС-2-0}$)	0,07	5,5	0,28	1,0
ТМ-5-18	0,07	0,4	0,15	0,35
ОКБ-122-7(1)	–	–	0,13...0,34	0,71
ОКБ-122-7(2)	0,12	≈ 15	0,13	0,62

Примечание. В скобках после марки наномасла указана дисперсная фаза и стабилизатор.

Магнитное наномасло МН1-ПЭС обладает очень хорошей коллоидной устойчивостью в гравитационных и магнитных полях. Низкотемпературные свойства магнитного наномасла и малая летучесть составляющих его компонентов позволяют использовать наномасло в условиях вакуума в диапазоне температур от -40 до $+100$ °С. Магнитное наномасло может эксплуатироваться в контакте с некоторыми жидкими полярными и неполярными химическими средами, например водой.

При температурах выше 100 °С происходит десорбция ПАВ в защитной оболочке магнитных частиц и в наномасле развиваются процессы агломерации. Если температура ниже -40 °С, вязкость начинает препятствовать перемещению масла в градиентном магнитном поле.

Триботехнические свойства наномасла МН1-ПЭС (см. табл. 3) несущественно отличаются от аналогичных свойств кремнийорганической жидкости ПЭС-5. Для их улучшения применяли присадки с различным механизмом влияния на процессы трения. Наблюдалась нетипичная для традиционных масел взаимосвязь между трибосвойствами наномасел и концентрацией присадки. Обычно добавление небольшого количества присадки в немагнитные масла приводит к непропорциональному уменьшению силы трения и износа. Для магнитных наномасел картина иная: при небольших концентрациях присадки (совол) наблюдается некоторое снижение трибосвойств наномасла (см. табл. 3). Ухудшение свойств наступает из-за антагонизма между молекулами присадки и ПАВ-стабилизатора. Введение присадки изменяет полярность дисперсионной среды и создает условия для увеличения свободных молекул стабилизатора, которые благодаря высокой поверхностной активности адсорбируются в первую очередь на трущихся поверхностях, экранируя ее от доступа присадки, и тем самым способствуют усилению износа. Увеличение содержания присадки в масле приводит к тому, что ее молекулы начинают доминировать в дисперсионной среде и играют определяющую роль в формировании граничного смазочного слоя.

Заметим, что магнитное наномасло МН1-ПЭС с увеличенным содержанием присадки совол обладает трибосвойствами, близкими к свойствам широко распространенных немагнитных трансмиссионных масел (см. табл. 3). Увеличение содержания присадки в наномасле выше 15 % (об.) позволяет снизить трение и износ, однако при этом повышается агрегативная неустойчивость наномасла, а повышенное содержание хлора присадки вызывает химическую коррозию поверхностей трения.

Введение в наномасло МН1-ПЭС присадки ДФ-11 не привело к ощутимому снижению трения и износа, как это наблюдалось для многих углеводородных немагнитных масел.

Присадка ЗН2ТЭ (хлорированный эфир пентадиена) позволяет существенно улучшить противоизносные свойства магнитного наномасла МН1-ПЭС. Значительный эффект в данном случае достигается при содержании присадки в количестве около 5 % (масс.). После введения присадки процесс трения становится более равномерным и амплитуда колебаний силы трения резко уменьшается. Коллоидную устойчивость наномасла данная присадка заметно не изменяет.

По сравнению с другими наномаслами с той же дисперсионной средой магнитные наномасла МН2-ПЭС и МН3-ПЭС (с добавкой МКС-2-0) имеют более высокую намагниченность насыщения, которая у МН2-ПЭС сочетается с относительно невысокой вязкостью. Наномасло МН2-ПЭС содержит мягкие сильномагнитные частицы железа, объемная концентрация которых приблизительно в пять раз ниже, чем в наномасле МН3-ПЭС, и поэтому во столько же раз различается их

вязкость. При контактных давлениях до нескольких мегапаскалей магнитные наномасла МН2-ПЭС и МН3-ПЭС имеют неплохие смазочные характеристики. При повышенных контактных давлениях смазочные свойства ухудшаются из-за отсутствия в составе наномасла достаточного количества молекул ПАВ, способных химически модифицировать поверхность трения.

Интересно отметить: сравнительные исследования свойств наномасел МН2-ПЭС и МН1-ПЭС показали, что ощутимо повысить смазочные характеристики магнитных наномасел только заменой твердых частиц магнетита на мягкие частицы железа не удастся. Поэтому не стоит преувеличивать абразивное действие магнитных частиц наномасел при трении.

Если не принимать во внимание магнитные особенности масла МН1-ПЭС, то по своим реологическим, низкотемпературным и коллоидным свойствам, по испаряемости и невосприимчивости к окружающей среде оно 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 масел, приведены в табл. 2. Испытания смазки ОКБ-122-7(1) проводили при разовой заправке узла трения смазкой, а смазки ОКБ-122-7(2) – при постоянном восполнении ее потерь на дорожке трения. Независимо от условий испытаний, смазочные свойства магнитного масла МН1-ПЭС выше, чем у смазки ОКБ-122-7, даже без присадки. Важный практический результат такого сравнения смазочных материалов заключается в том, что магнитные масла можно эффективно применять вместо пластичных смазок, содержащих полиэтилсилоксан.

Все рассмотренные смазочные масла 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 магнитного масла проводили длительные испытания узла трения, заправленного ограниченным объемом масла. Ресурс магнитного масла оказался приблизительно на 10 % меньше, чем, например, трансмиссионного масла ТМ-5-18 и на два-три порядка больше, чем пластичной смазки ОКБ-122-7. Магнитное масло переставало выполнять свое назначение после прекращения процесса поступления его в зону трения под действием магнитных сил из-за недопустимого повышения вязкости и снижения намагниченности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны технологические основы получения магнитных смазочных наномасел на основе полиэтилсилоксана, которые отличаются низкой летучестью и широким температурным диапазоном работы. Получены магнитные наномасла, стабилизированные различными по химическим свойствам ПАВ. Показаны некоторые отличительные физико-химические и трибологические особенности кремний-органических магнитных смазочных масел. Например, отмечена низкая коррозионная активность магнитных масел по отношению к металлическим поверхностям.

Смазочные свойства магнитных масел изучены при различных условиях трения, установлены их специфические особенности. Детально проанализировано влияние на

трение ряда противоизносных присадок, растворенных в маслах, и предложен механизм их действия. Выявлена, в частности, необычная экстремальная зависимость смазочных свойств от концентрации присадки.

Основной вывод по работе заключается в том, что по трибологическим свойствам разработанные магнитные наномасла сравнимы с традиционным пластичным и жидким смазочными материалами. Однако наличие у наномасел аномальных для жидкостей магнитных свойств значительно расширяет область их эффективного применения. В реальных узлах трения магнитные смазочные наномасла будут иметь преимущество из-за того, что их движением можно автоматически управлять магнитными полями, и это позволяет исключить работу фрикционного контакта в условиях смазочного голодания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др. / под. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Расчет ресурса магнитожидкостных узлов трения, работающих в вакууме или газовой среде // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2017. № 6. С. 294–303.
4. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
5. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных наномасел с различными дисперсионными средами // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
6. Bolotov A.N., Sozonov K.K., Orlov D.V. On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions // *Friction and wear*. 1991. V. 12. № 5. P. 824–831.
7. Мищак А. Трибологические свойства феррожидкости // *Трение и износ*. 2006. Т. 27. № 3. С. 330–336.
8. Фахрутдинов Р.З., Ганиева Т.Ф. Смазочные наномасла: учебное пособие. СПб.: Проспект науки, 2018. 160 с.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Ч. 1 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2013. № 6. С. 68.
10. Байбуртский Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: <http://maineticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (дата обращения: 12.03.2020).
11. Болотов А.Н., Лочагин Н.В., Михалев Ю.О. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Смазочные наномасла на основе кремний-органических наножидкостей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 4 (8). С. 13–21.

LUBRICATING OILS BASED ON ORGANOSILICON NANOFLUIDS

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

Technological features of synthesis of a polyethylsiloxane-based lubricating nanomaseline are described, and its lubricating properties are investigated under various friction conditions. Recommendations are given for the selection of components for creating magnetic lubricating oil, which are characterized by various mechanisms for reducing friction and wear of rubbing surfaces. The specific features of the processes of friction of surfaces lubricated with magnetic nano-oil are shown.

Keywords: magnetic lubricating oil, friction; wear, dispersed phase, magnetic dispersed phase, antifriction additives, antiwear additives.

REFERENCES

1. Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii [Magnetic fluids in mechanical engineering]. D.V. Orlov, Yu.O. Mikhailov, N.K. Myshkin i dr. Pod. red. D.V. Orlova, V.V. Podgorkova. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 272 p.
2. Fertman V.E. Magnitnyye zhidkosti: spravochnoe posobie [Magnetic fluids: a reference guide]. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1988. 184 p.
3. Bolotov A.N., Burdo G.B. Calculation of the resource of magnetofluidic friction units operating in a vacuum or gas medium. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*. 2017. No. 6, pp. 294–303. (In Russian).
4. Ermakov S.F. The effect of lubricants and additives on the tribological characteristics of solids. Part 2. Active Friction Management. *Trenie i iznos*. 2012. V. 33. No. 3, pp. 275–283. (In Russian).
5. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Investigation of the tribotechnical properties of nanostructured magnetic lubricating nanoparticles with various dispersion media. *Treniye i iznos*. 2017. V. 38. No. 2, pp. 107–113. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Sozonov K.K., Orlov D.V. On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions. *Friction and wear*. 1991. V. 12. No. 5, pp. 824–831.
7. Mishchak A. Tribological properties of ferrofluid. *Treniye i iznos*. 2006. V. 27. No. 3, pp. 330–336. (In Russian).
8. Fakhruddinov R.Z., Ganiyeva T.F. Smazochnyye nanomasla: uchebnoye posobiye [Lubricating Nano-Oils: Textbook.]. St. Petersburg: Prospekt nauki, 2018. 160 p.
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Mardyan M.V. A set of equipment for studying the physicochemical properties of nanodispersed magnetic media. Part 1. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2013. No. 6, pp. 68. (In Russian).
10. Bayburtsky F.S. Magnitnyye zhidkosti: sposoby polucheniya i oblasti primeneniya. [Magnetic fluids: production methods and applications]. URL: <http://maimeticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (date accessed: 12.03.2020).
11. Bolotov A.N., Lochagin N.V., Mikhalev Yu.O. The role of the magnetic field during friction of surfaces lubricated by magnetic oil. *Treniye i iznos*. 1988. V. 9. No. 5, pp. 870–878. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 07.08.2020; после рецензирования/revised: 26.10.2020;
принята/accepted 15.11.2020