

has been established that the optimal content of HCM-40 microspheres in rubbers based on SKPO is from 0.5 to 1 mass. parts per 100 mass. parts of rubber.

Keywords: propylene oxide rubber, corundum microspheres, deformation-strength and tribological properties, oil resistance, frost resistance.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-232

М.В. Прожега¹, Е.О. Константинов¹, Н.Н. Смирнов¹, В.В. Коровушкин¹,
Д.И. Попорецкий^{1,2}, Д.Ю. Глядяев³, О.С. Матина³, Н.В. Шевченко⁴

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, maksim.prozhega@yandex.ru

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия

⁴АО «Петровский научный центр «ФУГАС», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ТРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК

Аннотация

В данной работе исследовано влияние вида трения движения (скольжение/качение) на поведение противоизносных присадок литиевой пластичной смазки. Проведены испытания пластичного смазочного материала на износ в условиях трения скольжения (четырёхшариковая машина трения) и в составе подшипника качения. Для оценки износа подшипника качения разработана методика, позволяющая с высокой точностью оценить износ колец.

Приведен анализ результатов испытаний опытных образцов смазок и влияния смазочного материала на подшипник качения.

Ключевые слова: пластичные смазочные материалы, противоизносные добавки, смазывающие свойства, трение качения, трение скольжения, наноалмазы.

Введение

В связи с необходимостью уменьшения потерь энергии на трение был разработан и применяется широкий ассортимент антифрикционных и противоизносных добавок, включающий: дисульфид молибдена, наноалмазы, тальк, графит, металлические порошки алюминия, меди, свинца, олова, их оксиды и соли и др. [1]. Перечисленные добавки могут содержать соединения активных элементов, которые образуют защитные слои на трущихся поверхностях металлов, что приводит к снижению возникающих потерь на трение и уменьшению износа [2]. Одним из перспективных направлений улучшения смазывающих свойств пластичных смазочных материалов (далее ПСМ) является применение наноразмерных добавок [2-5]. Особое внимание уделяется изучению детонационных наноалмазов (ДНА), используемых в качестве противоизносной добавки к смазочным материалам [6]. Исследования противоизносных свойств масла И-20А [7] показали существенное снижение износа при трении по схеме «диск-контртело» при введении 0,01 % масс. ДНА в масло, а также восстановление линейных размеров

изношенных сопряжений автомобильных двигателей при эксплуатационных испытаниях. Помимо улучшения противоизносных свойств, исследуется влияние ДНА на противозадирные и реологические свойства ПСМ. В работе [8] установлено, что в процессе изготовления ПСМ ДНА выступают в качестве дополнительных центров структурообразования дисперсной фазы мыльных смазок на стадии охлаждения изотропного расплава мыла в масле. В результате образуется разветвленная бинарная дисперсная фаза (наноразмерные частицы добавки и соли высокомолекулярных жирных кислот) с прочно зафиксированными и равномерно распределенными по всему объему смазки наноразмерными частицами добавки. Подобная структура дисперсной фазы пластичной смазки обуславливает ее улучшенную коллоидную стабильность и несущую способность.

Использование ПСМ для смазки подшипников качения сопровождается работой при высоких контактных давлениях, которые на порядок выше, чем у подшипников скольжения. Влияние добавок на смазывающую способность ПСМ необходимо экспериментально исследовать в условиях трения качения. В представленной работе исследуется влияние добавок в составе литиевой ПСМ на ее смазывающие свойства и ресурс подшипников.

Цель работы: Исследование противоизносных и антифрикционных свойств добавок в составе литиевой пластичной смазки в условиях трения скольжения и трения качения.

Методы и материалы

Для отработки методики испытаний смазывающей способности ПСМ и определения ресурса подшипника, заправленного испытуемыми ПСМ в ИМАШ РАН разработали стенд для испытаний ПСМ на воздухе при комнатной температуре, рисунок 1 [13]. Для исследований используется упорный подшипник качения 8104 (ГОСТ 7872), на одно из колец которого наносят фиксированное количество смазочного материала.

Режимы испытаний на воздухе приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы испытаний ПСМ

Параметр	Значение
Частота вращения подшипника, об/мин	50
Осевая сила на подшипник, Н	2800
Удельное давление по Герцу, ГПа	1,32
Температура окружающей среды, °С	+22
Среда	Воздух

Ресурс подшипника качения, заправленного испытуемыми ПСМ оценивали по показателю относительного ресурса (R), который определялся как отношение количества оборотов (циклов) подшипника качения до остановки к массе нанесенного ПСМ в миллиграммах. Критерием остановки опыта было резкое повышение коэффициента трения или остановка после 240 часов работы.

Для каждого образца ПСМ проводили три параллельных испытания. На основе полученных результатов определяли среднее значение коэффициента трения и относительного ресурса.

Технология изготовления опытных образцов включала следующие операции. После введения добавок в исследуемый состав проводили гомогенизацию смазки при температуре 25 ± 3 °С с применением перемешивающего устройства для определения значения пенетрации (500 двойных ходов поршня). Готовую смазку

анализировали через 24-30 ч после гомогенизации. Технология введения ДНА дополнительно включала в себя предварительное ультразвуковое диспергирование порошка в масле И-20А с последующим введением суспензии в исследуемую смазку.

Таблица 2 – Испытуемые образцы ПСМ

Номер образца ПСМ	Наименование образца	Описание
1	Базовый ПСМ	В представленной работе в качестве базового использовался ПСМ, состоящий из масла И-20А (86 % масс.) загущенного литиевым мылом стеариновой кислоты (14 % масс.)
2	Базовый ПСМ + нанодиамазы детонационного синтеза (ДНА) (0.3%)	Указанный наноразмерный продукт получен при детонационном синтезе из смесей тротил/гексогена во взрывной камере ВК-10 в АО «Петровский НЦ «ФУГАС». Применяемый первичный продукт детонационного синтеза - нанодиамазная шихта, представлял собой мелкодисперсный порошок черного цвета, главным компонентом которого являются частицы ДНА.
3	Базовый ПСМ + противоизносная присадка (трикрезиловый эфир ортофосфорной кислоты (ТКФ)) (5.0 %)	Трикрезиловый эфир ортофосфорной кислоты представляет собой маслянистую, нелетучую, трудновоспламеняющуюся и невзрывоопасную жидкость, которая содержит от 2 % масс. до 37 % масс. о-изомеров и соответственно от 98 % масс. до 63 % масс. м- и п-изомеров. В пластичных смазках ТКФ успешно применяется в качестве противоизносной присадки, значительно снижающей износ поверхностей трения и коэффициент трения. Для исследования использовался ТКФ зарубежного производства (КНР).

Для оценки поверхности дорожек трения использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), совмещённую с микрорентгенспектральным анализом с дисперсией по энергии. СЭМ проводилась на растровом электронном микроскопе «Тескан» «Vega 3SB» с энергодисперсионным анализатором «10mm² SDD Detector - X-Act».

Для оценки противоизносных свойств была разработана методика измерения износа колец подшипника. Линейный износ оценивали по формуле:

$$h = H_1 - H_0 \quad (1)$$

где H_1 – глубина дорожки качения после испытаний, мкм,

H_0 – глубина дорожки качения до испытаний, мкм.

Измерения глубины дорожки качения проводили в четырех сечениях колец, как показано на рисунке 1. Для определения глубины дорожки качения использовали лазерный интерферометр «KEYENCE».

Испытания в условиях трения скольжения проводили по ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине трения (ЧМТ-1).

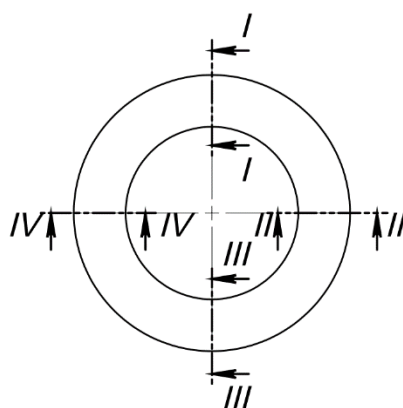


Рисунок 1 – Схема измерения глубины дорожек качения подшипника

Результаты и обсуждение

Испытания в условиях трения качения.

По результатам испытаний, представленных в таблице 3, было выявлено, что наибольшим коэффициентом трения обладает образец № 3, наименьшим – образец № 2. При испытаниях образца №1 два из трех опытов были остановлены по критерию превышения коэффициента трения (в опыте № 3 образец проработал 240 часов). Наибольший относительный ресурс показал образец №2 с добавкой ДНА. Остановленные до предельного времени образцы имеют более высокий относительный ресурс (опыт № 4 и № 5). Образцы ПСМ с добавкой трикрезилфосфата показали меньший относительный ресурс и наибольшее значение коэффициента трения.

Таблица 3 – Результаты испытаний ПСМ в условиях трения качении

Номер образца ПСМ	Номер опыта	Коэффициент трения f	Относительный ресурс R, об/мг	Примечания
1	1	0.0023	8 156	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	2	0.0018	26 389	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	3	0.0019	68 184	Был остановлен после 240 часов работы
2	4	0.0012	36 261	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	5	0.0011	10 648	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	6	0.0009	47 827	Был остановлен после 240 часов работы
3	7	0,0023	3 636	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	8	0,0036	1 787	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения
	9	0,0014	9 865	Остановлен после резкого повышения коэффициента трения

На рисунке 2 показаны поверхности дорожек качения колец подшипника после испытаний образцов № 2 и № 3, полученные с использованием СЭМ.

Поверхность дорожки качения колец подшипника после испытаний образца № 2 имеет выглаженный вид. Ширина дорожки контакта колец и шариков составляет около 1 мм. Для всей дорожки качения по кругу характерны белые

включения, которые свидетельствуют о наличии углеродсодержащих частиц на поверхности, рисунке 2 а).

На поверхности дорожки качения колец подшипника после испытаний образца № 3 присутствуют продукты триботехнических превращений смазочного материала рис.2 б). В результате элементного анализа было выявлено повышенное содержание железа и кислорода в этих соединениях.

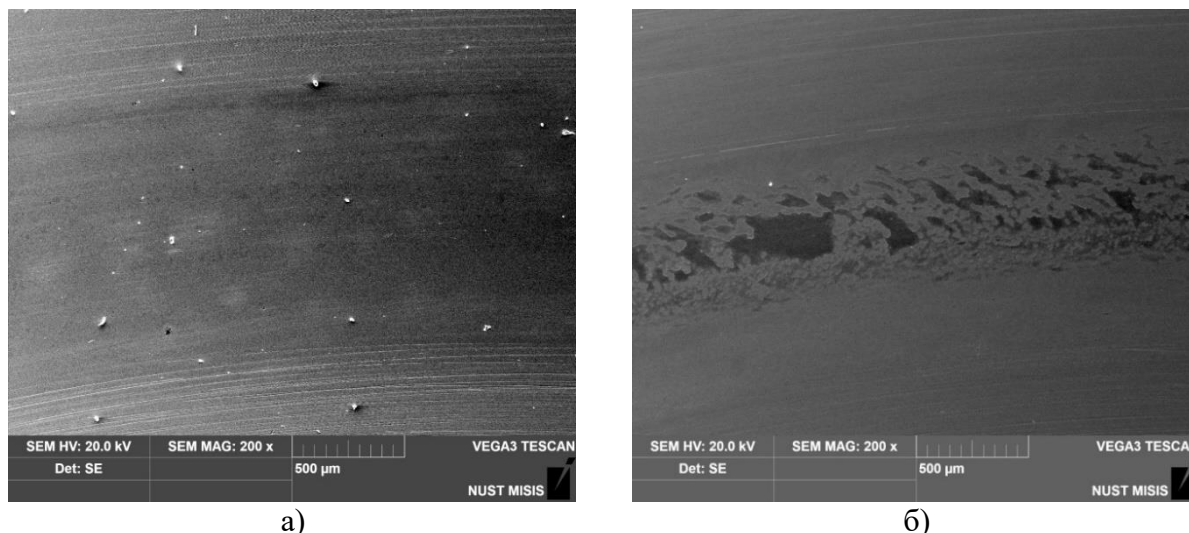


Рисунок 2 – Поверхность дорожки качения неподвижного кольца, при испытаниях смазочных материалов: а) образец № 2 в сечении 2; б) образец № 1 в сечении 3

В таблице 4 представлены результаты измерения износа колец подшипников. Отрицательные значения соответствуют износу колец, положительные – приращению в зоне трения (увеличение толщины кольца).

Таблица 4 – Результаты измерения износа колец подшипника

Сечение	Образец ПСМ №2				Длительность опыта, ч	Примечание
	I	II	III	IV		
Износ, мкм	5 (прирост)	7	23 (прирост)	42 (прирост)	80	Вращающееся кольцо
Износ, мкм	6 (прирост)	2	24 (прирост)	20 (прирост)		Неподвижное кольцо
Образец ПСМ №3						
Износ, мкм	1 (прирост)	12 (прирост)	19	27	15	Вращающееся кольцо
Износ, мкм	13	16 (прирост)	13	32		Неподвижное кольцо

В результате измерений износа колец установлено, что при испытаниях образца № 2 происходит локальное увеличение размера кольца. Измерения в четырех сечениях показывают увеличение толщины в зоне качения от 5 до 42 мкм в течение 80 часов работы исследуемого подшипника. При измерении износа после испытаний образца № 3 в некоторых сечениях также наблюдалось увеличение размера, однако, как показывает СЭМ, этот рост можно объяснить наличием на поверхности соединений железа, возникающих при трении. Максимальная величина износа колец при испытаниях образца № 3 составила 32 мкм за 15 часов работы подшипника.

Испытания в условиях трения скольжения

В таблице 5 представлены результаты проведенных исследований смазывающих свойств ПСМ на ЧМТ-1 по показателям противоизносных свойств ($D_{и}$) и противозадирных свойств ($P_{к}$ и $P_{с}$). Установлено, что в условиях трения скольжения, смазочная пленка, формируемая ПСМ с добавкой ТКФ (образец № 3) обладает существенно более высокой несущей способностью, чем у базового ПСМ (образец № 1) и образца с ДНА (образец № 2), что подтверждается значением $P_{к}$. При этом, введение в смазку как ДНА, так и ТКФ не приводит к увеличению показателя $P_{с}$. Противоизносные свойства образца № 2 с добавкой ДНА и образца № 3 с добавкой ТКФ, как видно из значений показателя $D_{и}$, находятся на одном уровне и превосходят противоизносные свойства базового ПСМ до двух раз.

Таблица 5 – Результаты исследований смазывающих свойств ПСМ на ЧМТ-1

Номер образца ПСМ	Трибологические характеристики на ЧМТ-1 по ГОСТ 9490		
	Диаметр пятна износа ($D_{и}$), мм	Критическая нагрузка ($P_{к}$), Н	Нагрузка сваривания ($P_{с}$), Н
1	0,72	617	1303
2	0,41	657	1381
3	0,37	823	1470

Заключение

Испытания литиевых ПСМ с различными добавками в составе упорного подшипника при нагрузке 2800 Н (давление 1,32 ГПа по Герцу), частоте вращения подшипника 50 об/мин, реализующего режим трения качения и на четырехшариковой машине трения, в которой наблюдается скольжение, показали, что свойства исследуемых добавок очень отличаются.

1. В условиях трения качения введение добавки ДНА (0,3 % масс.) в литиевый ПСМ приводит к увеличению относительного ресурса и снижению коэффициента трения относительно базового ПСМ. При этом введение в состав ТКФ в пропорции 5% ведет к снижению относительного ресурса в указанных условиях и увеличению коэффициента трения.

2. Измерения износа колец подшипников показали, что в условиях трения качения введение добавки ДНА (0,3 % масс.) в литиевый ПСМ ведет к образованию на поверхности модифицированного слоя толщиной до 42 мкм за 80 ч работы, природу которого необходимо изучать дополнительно. ПСМ с ТКФ в условиях трения качения формирует слой вторичных соединений, который может быть причиной повышенного коэффициента трения и снижения ресурса относительно базового ПСМ.

3. В условиях трения скольжения, которое характеризуется высокими контактными давлениями при испытаниях по четырехшариковой схеме, введение в базовый ПСМ добавки ДНА (0,3 % масс.) показателя противоизносных свойств (диаметр пятна износа ($D_{и}$)) снижается до двух раз, в сравнении базовым ПСМ (образец № 1) и имеет сопоставимый уровень значения с образцом № 3 (базовый ПСМ + ТКФ (5,0 % масс.)).

Таким образом, полученные результаты исследования подтверждают возможность применения отечественных детонационных наноалмазов в качестве перспективной противоизносной присадки взамен импортного трикрезилового эфира ортофосфорной кислоты в условиях трения скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Докшанин С.Г., Трошин С.И. Определение влияния концентрации добавки ультрадисперсного алмазографита на свойства пластичных смазочных материалов // Надежность изделий и материалов. - 2012. - С. 547-549.
2. Оганесова Э.Ю., Лядов А.С., Паренаго О.П. Наноразмерные присадки к смазочным материалам (обзор) // Журнал прикладной химии. 2018. - Т. 91, - № 10. - С. 1371-1387.
3. Berman D, Erdemir A, Sumant A. V. Graphene: A new emerging lubricant. *Materials Today*. - 2014. - 17(1): P. 31-42.
4. Wu YY, Tsui WC, Liu TC. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticale additives. *Wear*. - 2007. - 262, - P. 819-825.
5. Докшанин С.Г. Использование ультрадисперсного порошка алмазографита в качестве наполнителя к пластичным смазочным материалам // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13, - № 4. - С. 1043-1045.
6. Долматов, В. Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение // Успехи химии. - 2007. - Т. 76, - № 4. - С. 375-397.
7. Селютин Г.Е., Пузырь А.П., Ворошилов В.А., Бондарь В.С. Применение модифицированных наноалмазов для увеличения ресурса узлов трения // Труды ГОСНИТИ. 2011. №Т. 107, № 2. С. 25-29.
8. Жорник, В. И. Влияние наноразмерных добавок на формирование дисперсной фазы пластичных смазок // Вестник Витебского государственного технологического университета. - 2013. - № 2(25). - С. 82-89.
9. Аكوпова О.Б., Лапшин В.Б., Терентьев В.В., Богданов В.С. Карбоксилаты меди. Моделирование, синтез, мезоморфизм и трибологические свойства // Жидк. крист. и их практич. использ. - 2012. - Вып. 2. - С. 20–28.
10. Терентьев В.В., Аكوпова О.Б., Телегин И.А. Влияние карбоксилатов меди на основе валериановой и изовалериановой кислот на трибологические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. - 2016. - №2. - С. 100-105.
11. Терентьев В.В., Аكوпова О.Б., Телегин И.А. Влияние мезогенной присадки бегената меди на реологические и триботехнические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. - 2017. - №1. - С. 93-100.
12. Терентьев В.В., Аكوпова О.Б., Телегин И.А. Влияние присадок из смесей карбоксилатов меди на трибологические характеристики пластичных смазок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. - 2015. - №4. - С. 96-101.
13. Прожега М.В., Решиков Е.О., Смирнов Н.Н. Исследование ресурса и смазочных свойств пластичных смазочных материалов для подшипников качения при работе в космических условиях. Том: 42, № 6, 2021 г., с. 660-669.

M.V. Prozhega¹, E.O. Konstantinov¹, N.N. Smirnov¹, V.V. Korovushkin¹, D.I. Poporetskii^{1, 2}, D.Y. Glyadyaev³, O.S. Matina³, N.V. Shevchenko⁴

¹Mechanocal Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, maksim.prozhega@yandex.ru

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russia

³Federal Autonomous Enterprise “The 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defense of the Russian Federation”, Moscow, Russia

⁴«Petrovskiy science center «FUGAS» JSC, Moscow, Russia

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TYPE OF MOVING FRICTION ON THE BEHAVIOR OF ANTI-WEAR ADDITIVES

Abstract

This paper studies the influence of the type of friction (sliding/rolling) on the behavior of anti-wear additives in lithium grease. The grease was tested for wear under sliding friction conditions (four-ball friction machine) and as part of a rolling bearing. To assess the wear of a rolling bearing, a technique has been developed that allows for a high-precision assessment of ring wear.

The article provides an analysis of the test results of prototype lubricants and the effect of the lubricant on a rolling bearing.

Keywords: plastic lubricants, anti-wear additives, lubricating properties, rolling friction, sliding friction, nanodiamonds.

УДК 621.892

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-233

А. В. Шолом

Хозрасчётный творческий центр уфимского авиационного института,
г. Уфа, Россия. rosoil@rosoil.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ОХЛАЖДАЮЩИМИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация.

В работе приведены результаты исследований, целью которых являлось определение влияния охлаждающих свойств масляных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), применяемые в различных процессах металлообработки, на их триботехнические характеристики. Приведена конструкция и краткое описание установки УЗС-2, которая позволяет оценивать охлаждающие характеристики СОЖ и получать зависимости «температура-время», «температура-скорость» на металлической поверхности. Установлены экспериментальные зависимости триботехнических свойств испытуемых масляных СОЖ от их охлаждающих характеристик. Показано, что с увеличением температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения СОЖ, повышаются противозадирные и противоизносные свойства СОЖ, определенные по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине трения.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, охлаждающие характеристики, максимальная скорость охлаждения, триботехнические свойства, нагрузка сваривания.

Введение

Улучшение отвода тепла из зоны резания при применении СОЖ способствует снижению температуры на контакте «инструмент – деталь», что в свою очередь уменьшает интенсивность изнашивания инструмента и повышает его стойкость. В тоже время снижение температуры в зоне обработки позволяет повысить скоростные режимы обработки, точность получаемых размеров заготовки за счет уменьшения температурных деформаций и оказывает влияние на остаточные напряжения в поверхностном слое [1].

В настоящее время исследователями и разработчиками СОЖ для процессов